



УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ  
ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА  
УНИВЕРЗИТЕТА У КРАГУЈЕВЦУ

**Слободан М. Мишановић**

**Енергетске и еколошке перформансе  
аутобуса на електрични погон у  
систему транспорта путника**

Докторска дисертација

Крагујевац, 2020.



UNIVERSITY OF KRAGUJEVAC

FACULTY OF ENGINEERING  
UNIVERSITY OF KRAGUJEVAC

**Slobodan M. Mišanović**

**Energy and environmental performance  
of buses on the electrical drive in the  
passenger transport system**

Doctoral Dissertation

Kragujevac, 2020

## ИДЕНТИФИКАЦИОНА СТРАНИЦА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

|  |
|--|
| <b><i>I Аутор</i></b>  |
| Име и презиме: Слободан Мишановић  |
| Датум и место рођења: 23.06.1968. Земун, Република Србија  |
| Садашње запослење: ЈКП ГСП „Београд“ - Пројект менаџер   |
| <b><i>II Докторска дисертација</i></b>   |
| Наслов: Енергетске и еколошке перформансе аутобуса на електрични погон у систему транспорта путника  |
| Број страница: 216   |
| Број слика: 92   |
| Број библиографских података: 175  |
| Установа и место где је рад израђен:<br>Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу   |
| Научна област (УДК): Машинство, Аутобуси на електрични погон, Еколошке и техничке перформансе возила, 621.01 (656.132+62.83):574+629.07)   |
| Ментор: Др Драган Тарановић, ванредни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, ужа научна област: Моторна возила и мотори   |
| <b><i>III Оцена и одбрана</i></b>  |
| Датум пријаве теме: 09.10.2017. године   |
| Број одлуке Већа за техничко-технолошке науке Универзитета у Крагујевцу и датум прихватања теме дисертације: IV-04-100/11 од 14.02.2018. године  |
| Комисија за оцену научне заснованости теме и испуњености услова кандидата  |
| 1) Др Радивоје Пешић, редовни професор,<br>Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу,<br>2) Др Славен Тица, ванредни професор,<br>Саобраћајни факултет, Универзитет у Београду,<br>3) Др Јованка Лукић, редовни професор,<br>Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу,<br>4) Др Јасна Глишовић, ванредни професор,<br>Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу,<br>5) Др Драган Тарановић, доцент,<br>Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу.   |
| Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације:   |
| 1) Др Радивоје Пешић, редовни професор – председник Комисије,<br>Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу, Уже научне области:<br>Мотори СУС, Друмски саобраћај,<br>2) Др Јованка Лукић, редовни професор,<br>Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу, Уже научне<br>области: Моторна возила, Друмски саобраћај,<br>3) Др Јасна Глишовић, ванредни професор, Факултет инжењерских наука,<br>Универзитет у Крагујевцу, Уже научне области: Моторна возила и мотори,<br>4) Др Иван Благојевић, ванредни професор, Машински факултет<br>Универзитета у Београду, Ужа научна област: Моторна возила,<br>5) Др Предраг Живановић, доцент, Саобраћајни факултет Универзитета<br>у Београду, Ужа научна област: Друмски и градски транспорт путника. |
| Датум одбране дисертације:   |

## *Изјава захвалности*

*Докторска дисертације је резултат мог вишегодишњег рада и посвећености истраживањима употребе аутобуса на електрични погон. За њену реализацију захвалан сам свим људима који су ми помогли на том путу.*

*Део истраживања у оквиру докторске дисертације су реализована за потребе пројекта TP35041 финансираног од Министарства просвете, науке и технолошког развоја на основу предлога реализатора пројекта проф. др Радивоја Пешића и ментора докторске дисертације проф. др Драгана Тарановића.*

*Захваљујем се проф. др Драгану Тарановићу на вођењу менторства приликом израде дисертације и проф. др Радивоју Пешићу на саветима током похађања докторских студија. Желим да се захвалим свим члановима комисија који су учествовали у оцени дисертације и њене научне заснованости.*

*Захвалност дугујем др Златомиру Живановићу, вишем научном саветнику Института за нуклеарне науке "Винча" - Центар за моторе и возила, чија је подршка била од велике важности да се одлучим да уђем у свет науке и истраживања.*

*Захвалан сам предузећу у коме радим ЈКП ГСП "Београд" где сам као представник у UITP (International association for public transport) имао прилику да упознам искуства највећих светских компанија у експлоатацији аутобуса на електрични погон и да кроз истраживања које сам обавио на возилима ЈКП ГСП "Београд" урадим највећи део дисертације.*

*Желим да се пре свега захвалим мојим дугогодишњим колегама техничким директорима Душану Савковићу, дипл. инж. машинства и Душану Живићу, дипл. инж. машинства, који су ми омогућили и дали безрезервну подршку у реализацији свих тестова које сам спровео са аутобусима на електрични погон. Ништа мању захвалност желим да изразим колегама: Павлу Крстићу, дипл. инж. ел. и Слободану Иванову, дипл. инж. ел. на великој помоћи око реализације непосредних мерења.*

*Желим да се захвалим проф. др Ивану Благојевићу са Машинског факултета у Београду на указаном поверењу да будем део тима који је реализовао значајан истраживачки пројект везан за истраживање утицаја стила возње на енергетску ефикасност Е-буса.*

*На крају највећу захвалност дугујем мојој породици, супруги Ранки, кћерима Милени и Марији на подршци, стрпљењу и вери у мој рад као и родитељима мајци Мари и покојном оцу Милану који су ме својим васпитањем усмерили и извели на животни пут.*

*Аутор*

# Енергетске и еколошке перформансе аутобуса на електрични погон у систему транспорта путника

## Резиме

Аутобус на електрични погон (Е-бус) је концепт возила који се све више примењује у систему транспорта путника и представља главну алтернативу аутобусима са конвенционалним погоном. Енергетске перформансе Е-буса истраживане су кроз потрошњу и рекулпацију (регенерацију) електричне енергије у реалним условима рада и анализиран је утицај фактора (оптерећење, саобраћајни услови, рад система за грејање и хлађење, стил возње, итд) на вредности потрошене електричне енергије Е-буса на линијама јавног градског транспорта у Београду. Најмања потрошња електричне енергије Е-буса је током пролећно-јесењег периода рада, када се не користи систем за хлађење или грејање возила, при спољним температурама између 17 °C и 18 °C са малом и средњом попуњеношћу возила путницима у условима саобраћаја без поремећаја на траси. На основу добијених резултата истраживања енергетска ефикасност Е-буса је већа 3,54 пута у односу на аутобус са погоном на дизел гориво и 4,94 пута у односу на аутобус који за погон користи компримовани природни гас (КПГ) у условима рада на линији ЕКО 1 у Београду током пролећно-јесењег периода рада.

Еколошке перформансе Е-буса истраживане су кроз ефекте смањења емисије штетних издувних гасова који настају повлачењем из употребе аутобуса са погоном на дизел гориво или погоном на КПГ и увођењем Е-буса уместо њих. Посматрано на локалном нивоу Е-бус има нулту емисију загађења. У оквиру еколошких подобности употребе Е-буса истраживана је емисија угљен-диоксида (CO<sub>2</sub>) која настаје индиректно приликом производње електричне енергије и вршено је поређење са емисијама CO<sub>2</sub> које настају сагоревањем дизел горива и КПГ код аутобуса са конвенционалним погоном. Резултати истраживања на линији ЕКО 1 доказали су да аутобуси на електрични погон посматрано на годишњем нивоу имају за 12,1% мању емисију CO<sub>2</sub> у односу на аутобусе који користе дизел гориво и за 16,4% мању емисију CO<sub>2</sub> у односу на аутобусе који користе КПГ. Истраживане су и карактеристике емитоване буке која настаје од Е-буса на полигону и вршено је поређење са аутобусом са погоном на дизел гориво и КПГ у идентичним условима мерења. Доказано је да аутобус на електрични погон има између 7,1% и 10,9% мањи ниво емитоване буке у поређењу са аутобусом на дизел гориво и између 2,1% и 8,6% мањи ниво емитоване буке у поређењу са аутобусом на КПГ. Економски аспекти увођења Е-буса обрађени су у анализи трошкова и студији случаја поређења укупних трошкова у животном веку са аутобусима са погоном на дизел гориво и КПГ. Направљен је симулациони модел рада Е-буса на изабраној линији јавног градског транспорта. Добијени резултати средњих вредности потрошње електричне енергије Е-буса статистичких скупова симулираних резултата у поређењу са статистичким скуповима емпиријских резултата имају процентуална одступања испод 5%.

**Кључне речи:** Е-бус, потрошња електричне енергије, енергетска ефикасност, рекулпација, екологија, емисија CO<sub>2</sub>, емисија буке, симулација, систем транспорта путника

# Energy and environmental performance of buses on the electrical drive in the passenger transport system

## Abstract

The electric bus (E-bus) is a vehicle concept that is increasingly being implemented in the public transport system and it represents a major alternative to conventionally powered buses. Energy performance of the E-buses was researched through consumption and recuperation (recovery) of electric energy in real working conditions and the influence of various factors (load, traffic conditions, operation of heating and air conditioning systems, driving style, etc.) on the values of consumed electricity of the E-buses on urban public transport lines in Belgrade. The lowest electricity consumption of the E-bus is during the spring-autumn period of operation, when the vehicle air conditioning or heating system is not used, while the outdoor temperatures range between 17 °C and 18 °C, with low to medium passenger occupancy, and traffic conditions with no disturbances on the route. Based on the obtained research results, the energy efficiency of the E-bus is 3.54 times higher than the diesel-powered, and 4.94 times higher than the Compressed Natural Gas-powered bus (CNG-powered bus) in the conditions of work on the line EKO 1 in Belgrade, during the spring-autumn period.

The environmental performance of E-buses was researched through the effects of reducing the emission of harmful exhaust gases caused by eliminating from the use of diesel-powered or CNG-powered buses and introducing E-buses. Observed locally, the E-bus has zero pollution emission. Within the ecological suitability of the use of E-buses, the emission of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) that occurs indirectly during electricity production was researched and a comparison was made with the emissions of CO<sub>2</sub> caused by the combustion of diesel-fuel and CNG in buses with conventional propulsion. The results of the research on the EKO 1 line proved that electric buses, observed on an annual basis, have 12.1% lower CO<sub>2</sub> emission, compared to buses that use diesel fuel, and 16.4% lower CO<sub>2</sub> emission, compared to buses that use CNG. The research of characteristics of the emitted noise generated by the E-bus at the test site was also carried out, and a comparison with the diesel-powered and CNG-powered bus in identical measurement conditions. It was proven that an electric bus has between 7.1% and 10.9% lower noise emitting levels compared to a diesel-powered bus and between 2.1% and 8.6 lower noise emitting levels compared to a CNG-powered bus. The economic aspects of putting E-buses into use have been addressed through a cost analysis, and a case study comparing the total lifetime costs with diesel and CNG buses. A simulation model of E-bus operating on a selected line of urban public transport was made. The mean values of obtained results regarding the E-bus electricity consumption of the statistical sets of simulated results, in comparison with the statistical sets of empirical results, have percentage deviations below 5%.

**Keywords:** E-bus, electricity consumption, energy efficiency, recovery, ecology, CO<sub>2</sub> emissions, noise emission, simulation, public transport system

## САДРЖАЈ:

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА.....</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1 Место и значај транспортног сектора у потрошњи фосилних горива и емисији штетних издувних гасова и угљен-диоксида.....                 | 2         |
| 1.2 Предмет истраживања, научни циљеви и полазне хипотезе докторске дисертације.....   | 5         |
| <b>2. ПРЕГЛЕД НАУЧНИХ РАДОВА И ИСТРАЖИВАЊА ИЗ ОБЛАСТИ ЕНЕРГЕТСКЕ ЕФИКАСНОСТИ И ЕКОЛОШКИХ ПЕРФОРМАНСИ АУТОБУСА НА ЕЛЕКТРИЧНИ ПОГОН.....</b> | <b>12</b> |
| <b>3. КОНЦЕПТ АУТОБУСА НА ЕЛЕКТРИЧНИ ПОГОН.....</b>  | <b>19</b> |
| 3.1 Историјски приказ развоја аутобуса на електрични погон.....  | 19        |
| 3.2 Конфигурације погона код аутобуса на електрични погон .....  | 20        |
| 3.2.1 Аутобуси са потпуно електричним погоном.....   | 21        |
| 3.2.2 Аутобуси на електрични погон са батеријама .....   | 22        |
| 3.2.3 Аутобуси на електрични погон са суперкондензаторима.....   | 22        |
| 3.2.4 Аутобуси на електрични погон са горивним ћелијама .....  | 23        |
| 3.2.5 Тролејбус са аутономним електричним погоном .....  | 24        |
| 3.3 Основне компоненте аутобуса на електрични погон .....  | 25        |
| 3.3.1 Погонски електромотор (генератор).....   | 25        |
| 3.3.2 Систем за складиштење електричне енергије код Е-буса.....  | 29        |
| 3.4 Систем регулације, контроле и управљања електричном енергијом код аутобуса на електрични погон .....                                   | 32        |
| 3.5 Помоћни уређаји и системи који користе електричну енергију.....  | 34        |
| 3.6 Систем за пуњење електричном енергијом.....  | 34        |
| <b>4. УВОЂЕЊЕ АУТОБУСА НА ЕЛЕКТРИЧНИ ПОГОН У СВЕТУ.....</b>  | <b>38</b> |
| 4.1 Увођење аутобуса на електрични погон у Кини и Азији.....   | 38        |
| 4.2 Увођење аутобуса на електрични погон у Европи .....  | 39        |
| 4.3 Увођење аутобуса на електрични погон у Северној Америци .....  | 42        |
| 4.4 Увођење аутобуса на електрични погон у Јужној Америци.....   | 42        |
| 4.5 Увођење аутобуса на електрични погон на Новом Зеланду и Аустралији.....  | 43        |
| 4.6 Преглед произвођача аутобуса на електрични погон.....  | 43        |
| 4.7 Даљи правци увођење аутобуса на електрични погон у Европи и свету.....   | 44        |
| 4.8 СВОТ (SWOT) анализа увођења аутобуса на електрични погон .....   | 44        |
| <b>5. ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ КРЕТАЊА И РЕГЕНЕРАТИВНОГ КОЧЕЊА АУТОБУСА НА ЕЛЕКТРИЧНИ ПОГОН.....</b>   | <b>46</b> |
| 5.1 Анализа отпора кретања аутобуса на електрични погон.....   | 46        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 5.2       | Перформансе погонског система аутобуса на електрични погон .....   | 50         |
| 5.3       | Анализа регенеративног кочења аутобуса на електрични погон .....   | 53         |
| <b>6.</b> | <b>ПОТРОШЊА ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ АУТОБУСА НА ЕЛЕКТРИЧНИ ПОГОН.....</b>  | <b>57</b>  |
| 6.1       | Мерење потрошње електричне енергије код аутобуса на електрични погон са батеријама .....   | 60         |
| 6.2       | Поређење енергетске ефикасности Е-буса и дизел аутобуса.....   | 63         |
| 6.3       | Мерење потрошње електричне енергије код аутобуса на електрични погон са суперкондензаторима.....   | 65         |
| 6.4       | Просторне и геометријске карактеристике линије ЕКО 1 .....   | 66         |
| 6.5       | Карактеристике токова путника на линији ЕКО 1 .....  | 67         |
| 6.6       | Карактеристике возног циклуса и саобраћајних услова на линији ЕКО1 .....   | 69         |
| 6.7       | Карактеристике климатских услова рада Е-буса у Београду .....  | 71         |
| 6.8       | Анализа потрошње електричне енергије Е-буса.....   | 72         |
| 6.8.1     | Анализа потрошње електричне енергије Е-буса на линији ЕКО 1 у пролећно-јесењем периоду .....   | 75         |
| 6.8.2     | Анализа потрошње електричне енергије Е-буса на линији ЕКО 1 у летњем периоду.....  | 85         |
| 6.8.3     | Анализа потрошње електричне енергије Е-буса на линији ЕКО 1 у зимском периоду.....   | 95         |
| 6.8.4     | Упоредни приказ резултата потрошње електричне енергије Е-буса на линији ЕКО 1 током пролећно-јесењег, летњег и зимског периода рада.....       | 102        |
| 6.8.5     | Утицај стила вожње на потрошњу електричне енергије Е-буса .....  | 106        |
| <b>7.</b> | <b>РЕКУПЕРАЦИЈА ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ АУТОБУСА НА ЕЛЕКТРИЧНИ ПОГОН.....</b>  | <b>108</b> |
| 7.1       | Мерење рекуперације и потрошње електричне енергије на линији ЕКО 1.....  | 113        |
| 7.2       | Мерење рекуперације електричне енергије на линији бр. 29 (Дорћол-Медаковић III).....   | 119        |
| <b>8.</b> | <b>ЕКОЛОШКЕ ПЕРФОРМАНСЕ РАДА АУТОБУСА НА ЕЛЕКТРИЧНИ ПОГОН НА ЛИНИЈАМА ЈАВНОГ ГРАДСКОГ ТРАНСПОРТА У БЕОГРАДУ.....</b>                           | <b>126</b> |
| 8.1       | Анализа еколошких перформанси аутобуса на електрични погон.....  | 127        |
| 8.2       | Анализа емисије угљен-диоксида CO <sub>2</sub> .....   | 127        |
| 8.3       | Анализа TTW и WTW еколошких перформанси аутобуса на електрични погон у поређењу са аутобусима са погоном на дизел гориво и КПП у Београду..... | 133        |
| 8.4       | Мерење емисије буке Е-буса Higer KLQ6125GEV3 .....   | 137        |
| 8.5       | Рециклажа аутобуса на електрични погон.....  | 139        |
| <b>9.</b> | <b>ЕКОНОМСКИ АСПЕКТИ РАДА АУТОБУСА НА ЕЛЕКТРИЧНИ ПОГОН.....</b>  | <b>143</b> |
| 9.1       | Инвестициони трошкови.....   | 143        |
| 9.2       | Оперативни трошкови .....  | 146        |



|            |   |            |
|------------|---|------------|
| 9.3        | Студија случаја увођења аутобуса на електрични, дизел или погон на КПП .....  | 151        |
| <b>10.</b> | <b>МОДЕЛИРАЊЕ ВОЗНОГ ЦИКЛУСА И СИМУЛАЦИЈА РАДА АУТОБУСА НА ЕЛЕКТРИЧНИ ПОГОН.....</b>  | <b>154</b> |
| 10.1       | Моделирање основног возног циклуса рада Е-буса.....   | 154        |
| 10.2       | Улазни параметри симулације рада Е-буса Higer KLQ6125GEV3.....  | 157        |
| 10.3       | Симулација рада Е-буса Higer KLQ6125GEV3 на основном возном циклусу.....  | 160        |
| 10.4       | Поређење резултата мерења и симулације рада Е-буса Higer KLQ6125GEV3 на основном возном циклусу.....                          | 168        |
| 10.5       | Симулација рада Е-буса Higer KLQ6125GEV3 на основном возном циклусу при кретању возила по инерцији .....                      | 169        |
| 10.6       | Моделирање и симулација рада Е-буса Higer KLQ6125GEV3 на градској линији јавног градског транспорта .....                     | 170        |
| 10.7       | Резултати симулација рада Е-буса Higer KLQ6125GEV3 на линији ЕК01 (Вуков споменик-Насеље Белвил), пролећно-јесењи период..... | 179        |
| 10.8       | Резултати симулација рада Е-буса Higer KLQ6125GEV3 на линији бр. 29 (Дорћол-Медаковић III) .....                              | 186        |
| <b>11.</b> | <b>ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА.....</b>   | <b>192</b> |
| 11.1       | Доприноси спроведених истраживања.....  | 196        |
| 11.2       | Ограничења у истраживању.....   | 197        |
| 11.3       | Даљи правци истраживања .....   | 198        |
| <b>12.</b> | <b>ЛИТЕРАТУРА.....</b>  | <b>199</b> |
|            | <b>ПРИЛОГ 1.....</b>  | <b>210</b> |
|            | <b>ПРИЛОГ 2.....</b>  | <b>211</b> |
|            | <b>ПРИЛОГ 3.....</b>  | <b>214</b> |
|            | <b>ПРИЛОГ 4.....</b>  | <b>216</b> |

## 1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА

Потреба за коришћењем све већих енергетских ресурса, проблем заштите животне средине, стални тренд пораста броја становника у градовима, у овом тренутку представљају неке од најзначајнијих проблема и изазова са којима се свет, а посебно велики градови суочавају. Интензивни развој аутомобилске индустрије једно је од обележја друге половине двадесетог века. Почетком седамдесетих година 20. века услед нафтне кризе све развијене земље света, као и водећи произвођачи возила, кренули су у истраживање алтернативних горива и погона како би се делимично ублажила зависност од коришћења фосилних горива. Кључно питање које је стављено у први план и које је захтевало неодложно решавање постало је питање екологије, односно рапидно повећање загађења животне средине, као директна последица сагоревања фосилних горива.

Енормно ослобађање угљен-диоксида ( $\text{CO}_2$ ), пре свега из аутомобилских мотора и индустријских постројења, довели су до глобалног загревања, изазивања ефекта стаклене баште, настајање киселих киша и оштећења горњих слојева атмосфере. Ово питање остало је актуелно до данас и постало је важно питање у многим делатностима транспорта, индустрије, енергетике, економије, законодавства и политике развоја градова и држава. Познато је да нафта као енергетски ресурс има ограничен век експлоатације, што ће утицати на интензивна истраживања и могућности коришћења других алтернативних видова енергије. Употреба фосилних горива директно је пропорционална са индустријским и економским развојем [1]. Државе теже сталном повећању развијености, што доводи до све веће употребе фосилних горива, што утиче на додатно повећање емисије штетних гасова и угљен-диоксида. Историјски посматрано у периоду од 1920. до 2005. године заступљеност фосилних горива (нафта, природни гас и угаљ) била је доминантна, док је учешће осталих енергетских извора било минимално [1].

Да би се ефекат загађења који потиче од фосилних горива смањио, многе државе ограничавају употребу фосилних горива и афирмишу коришћење алтернативних и обновљивих извора енергије. Најважнији обновљиви извори енергије су коришћење енергије ветра, соларна енергија, геотермална енергија, биомаса, итд. Према подацима Међународне агенције за енергију (International Energy Agency) у 2014. години снага система за производњу електричне енергије из обновљивих извора износила је 128 GW [2]. Учешће ветрогенератора износило је 37% док су фотонапонске ћелије имале учешће од око 33% [2]. Пораст производње електричне енергије из ветрогенератора има стални тренд раста, посебно у државама које имају територије са великим бројем дана у години када дува јак ветар, што се може видети из примера Данске. У јулу 2015. године производња електричне енергије из ветрогенератора била је доминантна у односу на остале изворе као последица дувања снажних ветрова [2].

И поред наведених чињеница, фосилна горива остају још увек доминантни извор енергије у свету. Њихова супституција са алтернативним изворима енергије представља један од највећих изазова савременог света посматрана са аспекта енергетике, индустрије и транспорта.

## 1.1 Место и значај транспортног сектора у потрошњи фосилних горива и емисији штетних издувних гасова и угљен-диоксида

Сектор транспорта заузима важно место у задовољавању потреба друштва у транспорту роба и превозу путника али истовремено је и извор емисије штетних гасова и угљен-диоксида као значајних узрочника нарушавања животне средине. У већини развијених земаља друмски транспорт представља значајан извор загађујућих материја. Аерозагађење се дефинише присуством чврстих, течних и гасовитих супстанци насталих природним или антропогеним процесима које се у атмосфери јављају у већим количинама од прописаних.

Код мотора са унутрашњим сагоревањем (мотора СУС) од укупне енергије која се ослобађа у процесу сагоревања горива у мотору, највише 42% се користи за покретање возила, док остатак од око 58% представља губитке [3].

Већа енергетска ефикасност мотора утиче на нижу емисију и обрнуто. Због увођења нових стандарда и ограничења, емисија из аутомобилских мотора увелико је смањена, ипак и даље око 60% од укупне количине свих загађујућих материја ваздуха у урбаним срединама потиче од мотора са унутрашњим сагоревањем [4]. Главни загађивачи ваздуха у великим градовима који потичу од саобраћаја су: угљен-моноксид (CO), оксиди-азота (NO, NO<sub>2</sub>), угљоводоници (C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>), микрочестице (PM<sub>2,5-10</sub>), чађ и органска једињења, VOCs (Volatile Organic Compounds), од којих су најприсутнији бензен, ксилен и толуол. Концентрације ових материја у ваздуху изнад дозвољених вредности неповољно се одражавају на здравље људи као и на биљни и животињски свет. Према подацима Светске здравствене организације, WHO (World Health Organization), утицај штетних материја из ваздуха директни је узрочник настанка акутних и хроничних обољења код људи [5]. Према проценама Светске банке (World bank) данас око четири милијарде (55%) светског становништва живи у градовима, а очекује се да ће 2045. године број становника који живе у градовима достићи шест милијарди [6]. Према Боровику (Borowik) у Европи тренутно 75% становништва живи у градовима, што ће довести до даљег повећавања емисије угљен-диоксида и загађења која потичу од саобраћаја [7]. Трендови повећања градског становништва утичу и на повећање броја возила, што намеће све већу важност примене алтернативних погона код возила (возила на електрични погон, водоник, природни гас, итд) и употребе обновљивих извора енергије.

Према извештају Европске комисије из 2017. године (European Commission, 2017) у Европи, 94% сектора транспорта користи нафту као погонско гориво, од чега је 84% нафта пореклом из увоза. Европска унија (European Union) троши око 187 милијарди евра годишње како би задовољила потребе за транспортом. Са својим негативним утицајима транспорт генерално чини око 23% емисије гасова који изазивају ефекат стаклене баште, GHG (Greenhouse gas) у 2015. години, од којих је највише присутан угљен-диоксид, док је друмски саобраћај одговоран за једну петину укупних емисија [8]. Према извештају Европске агенције за животну средину, ЕЕА (European Environment Agency, 2017) када се посматрају различити видови саобраћаја највећи удео GHG емисије у 2015. години има друмски саобраћај са уделом од 72,9%. Авио саобраћај има учешће од 13,3%, речно-поморски 12,8% а железнички само 1% [9]. Загађење ваздуха које потиче од друмског саобраћаја према проценама ЕЕА, може бити узрочник озбиљних болести које могу изазвати 3,47 милиона смртних случајева [9].

Осим емисије штетних гасова, присуство буке од друмског саобраћаја је један од важнијих проблема који треба решити, јер је друмски саобраћај у доброј мери одговоран за настанак буке. У Европи, у урбаним срединама је 2012. године око 73,5 милиона становника било изложено буци изнад 55 dB. Чак и изван урбаних подручја око 30 милиона људи је изложено негативном утицају буке од друмског саобраћаја. Изложеност буком може изазвати стрес, кардиоваскуларна обољења, поремећај спавања, хипертензију и друге сметње [9].

У сектору транспорта веома је значајна делатност транспорта путника. Аутобуски подсистем јавног градског транспорта у градовима представља један од најзначајнијих сегмената урбаног живота града, који има директан утицај на задовољење друштвено-економских и других потреба становника. Захваљујући својим техно-експлоатационим предностима и флексибилности, улога аутобуског подсистема у транспорту путника и повезивању градских целина остала је незаменљива.

Према подацима Међународне организација за јавни превоз, UITP (International Public Transport Organisation), 2012. године у Европској унији у 100 највећих градова у експлоатацији је било око 55.000 градских аутобуса, који остваре око 80% транспортног рада [10]. У земљама Европске уније око 79% аутобуса који су у систему градског транспорта путника као погонску енергију користи дизел гориво [11] и један су од главних узрочника урбаног загађења. Према истраживањима обављеним у Лондону, аутобуси су одговорни за 8% емисије угљен-моноксида; 6% угљоводоника; 9% емисије азотних оксида; 7,7% емисију честица и 5% угљен-диоксида [12]. Слична ситуација је и у Паризу где је 4.000 аутобуса у систему јавног превоза одговорно за 5% загађења повезаног са превозом, док у Берлину 1.800 аутобуса наспрам милион путничких аутомобила има удео у емисији издувних гасова око 1% [12].

Посебну угроженост имају они саобраћајни коридори унутар ужег градског језгра где су фреквенције пролазака аутобуса и осталих возила највеће, а стамбено ткиво и профили улица такви да онемогућавају ефикасно проветравање, што доводи до концентрације штетних материја изнад дозвољених вредности.

У Београду, аутобуси највећег превозника ЈКП ГСП „Београд“ за реализацију планираног годишњег транспортног рада утроше око 31,29 милиона литара евро-дизел горива [13]. Ако се анализирају најзначајнији и најфреквентнији коридори у граду Београду, на којима свакодневно функционишу аутобуси јавног градског транспорта, долази се до закључка да посебно у вршном оптерећењу аутобуси који користе дизел гориво значајно утичу на повећање емисије штетних гасова.

Смањење аерозагађења као последица саобраћаја у Београду може се значајно унапредити енергетским, еколошким и техничко-оперативним мерама у аутобуском подсистему јавног градског транспорта. Један од најефикаснијих начина јесте замена са аутобусима на електрични погон. Управо из тих разлога аутобуски подсистем јавног градског транспорта путника добио је на значају као главни промотер нових технологија у спровођењу стратегије одрживог транспортног система града. Одрживи развој у општем значењу представља равнотежу потрошње расположивих ресурса и способности обнављања истих. Систем јавног градског транспорта путника има кључну улогу у процесу реализације концепта одрживог развоја града кроз утицај на систем градског транспорта [14,15]. За постизање одрживог градског транспорта путника, посебно

је важно размотрити социјалне, еколошке и економске аспекте [7]. Социјални аспект представља задовољење потреба становника за квалитетним, поузданим и безбедним јавним градским транспортом, еколошки аспект смањење емисије штетних гасова и емисије GHG а економски аспект, финансијски прихватљив и исплатив концепт превоза.

Наведене чињенице су иницирале усвајање у Европи низа строгих стандарда који се односе на ограничење емисије издувних гасова од стране возила на конвенционални погон, почев од регулативе број 49 из 1982. године (ECE Regulation No. 49), преко ЕУРО норми емисије, ЕУРО 1 до ЕУРО 6 (1990-2014. година). У периоду од 1992-2013. године увођење аутобуса са погоном на компримовани природни гас (КПГ), течни нафтни гас (ТНГ), био горива и хибридно-електрични погон, довело је до значајног напретка у смањењу емисије штетних гасова: угљен-моноксида, азотних оксида, угљоводоника и микрочестица. У Сједињеним Америчким Државама (САД) ограничења емисије штетних гасова на возилима за друмски саобраћај познатим под именом Калифорнија тест (California test) присутна су још раније и датирају из прве половине седамдесетих година двадесетог века.

Проблем који је код аутобуса и возила са конвенционалним погоном остао и даље присутан јесте емисија угљен-диоксида која је директно пропорционална количини сагорелих течних фосилних горива [16]. Према истраживању Глоц-Рихтера и Коха (Glottz-Richter, Koch) из 2016. године један зглобни аутобус који вози на градским линијама у Европи потроши око 40.000 литара дизела горива годишње [17]. Од децембра 2010. године у земљама Европске уније, примењује се Директива 33/2009 (Directive 33/2009/EC) [18], која се односи на промовисање енергетски ефикасних и еколошки чистих возила у друмском транспорту која се користе у јавном сектору, као што су аутобуси за јавни превоз, комунална возила итд. Директива дефинише стратегију смањења емисије CO<sub>2</sub> за 20% до 2020. године у поређењу са базом 1990. годином. Значајно је истаћи да директива регулише еколошке и енергетске критеријуме вредновања приликом тендерских процедура за набавку нових возила од којих је веома значајна потрошња горива изражена у L·(100·km)<sup>-1</sup> и која је саставни део тендерске документације. Овом директивом дефинише се и цена емисије CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>, PM, изражене у Евро по килограму, €·kg<sup>-1</sup>, за сваки продукт загађења коју плаћају превозници чија возила проузрокују аерозагађење. Државе Европске уније су у обавези да до 2025. године, односно 2030. године у градове имплементирају прописано учешће "чистих возила" (електрична, хибридна, са погоном на компримовани природни гас - КПГ) у систем јавног градског транспорта, што је дефинисано Директивом 94/2014 (Directive 94/2014/EC) [19]. С обзиром да је Република Србија држава кандидат за улазак у Европску унију важно је планирати будуће стратегије развоја система јавног градског транспорта, посебно аутобуског подсистема у складу са овом директивом и очекиваном квотом која би била додељена нашој земљи. Друмски транспорт у наредном периоду остаће доминантан извор аерозагађења, нарочито унутар градских агломерација. Једна од стратегија смањења аерозагађења која потиче од транспорта дефинисана је "Белом књигом транспортне политике Европске комисије" (European Commission White Paper, 2011a) [20]:

- примена алтернативних погонских система и унапређење конструкције возила,
- примена реформулисаног горива,

- оптимизација управљања саобраћајем унутар градова,
- примена строжих стандарда емисије.

У "Белој књизи транспортне политике Европске комисије" веома је важно истаћи два циља који треба да смањење емисију штетних гасова и GHG од друмског транспорта:

- смањење емисије од 20%, од нивоа из 2008. до 2030. године,
- смањење емисије за 60%, од нивоа из 1990. до 2050. године.

Масовније увођење аутобуса са електричним погоном у систем јавног градског транспорта путника, према "Белој књизи" представља део дугорочне стратегије употребе искључиво возила са нултом емисијом која ће бити у градовима после 2050. године. До сличних закључака дошло се и кроз пројекат "Чиста флота" (Clean fleets) [21], где се у оквиру сектора јавног градског транспорта путника у Европској унији, главни правци у смањењу емисије штетних гасова и емисије CO<sub>2</sub> односе на:

- побољшање еколошких и енергетских карактеристика возила, посебно мотора са унутрашњим сагоревањем, смањење тежине возила, боља аеродинамика, мањи губитак у трансмисији,
- примена алтернативних горива (електрична енергија, водоник, природни гас, биогорива) посебно из обновљивих извора,
- организационе мере, укључујући енергетски ефикасне стилове вожње (еко вожња), повећање учешћа јавног транспорта на рачун индивидуалног превоза.

## 1.2 Предмет истраживања, научни циљеви и полазне хипотезе докторске дисертације

Аутобуси на електрични погон у систему јавног градског транспорта у задњих неколико година имају изразит тренд развоја и све већу примену, чиме су постали једна од најбољих опција возила са нултом емисијом издувних гасова на локалном нивоу. Употреба електричне енергије из обновљивих извора за погон је додатни квалитет коришћења овог типа возила са циљем смањења емисије CO<sub>2</sub> на глобалном нивоу. У последње три године приметан је значајан пораст у експлоатацији овог типа аутобуса, па је реално очекивати да ће у наредном периоду њихов број у редовној експлоатацији бити све већи, чиме ће постати главна алтернатива аутобусима са погоном на дизел гориво и КПГ. Убрзани развој технологије складиштења електричне енергије помоћу батерија и суперкондензатора и развој система за брзо пуњење допринели су да концепт електричног аутобуса у последњих неколико година буде све више присутан у многим светским и европским градовима. Од септембра 2016. године у Београду је пуштена прва линија на којој раде искључиво аутобуси на електрични погон. Употреба електричне енергије из обновљивих извора за погон и могућност генерисања електричне енергије (рекуперација) током рада је додатни квалитет коришћења овог типа возила који значајно повећава енергетску ефикасност и смањује емисију издувних гасова на локалном нивоу.

Управо из тих разлога аутобуси на електрични погон добијају на значају као главни промотер нових технологија у спровођењу стратегије одрживог развоја града и унапређења енергетске ефикасности, чиме се отварају различите

могућности истраживања коришћења овог концепта погона и стицања нових сазнања, што дисертацији даје иновативни карактер.

Преглед објављених научних радова и истраживања која се односе на аутобусе на електрични погон са аспекта енергетске ефикасности, рекулпације електричне енергије у фази кочења, еколошких перформанси и експлоатационих показатеља која су рађена у Европи и свету представљају важан део истраживања у докторској дисертацији.

Приказ основних законитости теорије кретања и регенеративног кочења код аутобуса на електрични погон и перформансе погонског система у различитим режимима рада возила су такође део теоријског истраживања које је приказано у дисертацији.

Најважнији део истраживања су ефекти коришћења аутобуса на електрични погон на градским линијама у Београду са становишта потрошње електричне енергије у различитим режимима рада, енергетске ефикасности и еколошких утицаја у поређењу са аутобусима са погоном на дизел гориво и погоном на КПП, узимајући у обзир све специфичности које има систем транспорта путника града (токови путника, саобраћајни услови, период године и конфигурација терена).

Анализа измерене потрошње електричне енергије и енергије рекулпације која настаје у фази кочења у различитим режимима рада аутобуса на електрични погон представља део истраживања као и утврђивање утицаја појединих техничких и експлоатационих фактора на измерене вредности.

Истраживање у оквиру дисертације обухвата и анализу еколошких утицаја примене аутобуса на електрични погон на градским линијама, односно ефекте смањења емисије штетних издувних гасова, емисије угљен-диоксида и емисије емитоване буке, као последица замене аутобуса са погоном на дизел гориво или погоном на КПП аутобусима на електрични погон. У оквиру еколошких утицаја рада аутобуса на електрични погон истражене су специфичности рециклаже овог концепта погона градског аутобуса.

Економски ефекти увођења аутобуса на електрични погон су део истраживања који је значајан у сагледавању укупних трошкова у животном веку возила и поређење истих са трошковима аутобуса са другим погонским системима.

Битан елемент истраживања представља моделирање и симулација рада аутобуса на електрични погон према задатом возном циклусу или елементима рада на линији јавног градског транспорта (токови путника, статички и динамички елементи линије). Моделирање и симулација треба да омогуће добијање резултата потрошње електричне енергије Е-буса који су блиски резултатима остварене потрошње Е-буса на линији где већ аутобус ради или резултатима полигонских испитивања према задатом возном циклусу. Сврха симулационог модела рада аутобуса је да се при пројектовању произвољне линије јавног градског транспорта на основу тополошких карактеристика линије, токова путника и карактеристика аутобуса процене ефекти примене аутобуса на електрични погон.

Почетно истраживање потрошње електричне енергије и енергетске ефикасности аутобуса на електрични погон са батеријама произвођача БИД (BYD), модел BYD E12, на градској линији бр.41 (Студентски трг-Бањица II) и поређење са аутобусом

који има погон на дизел гориво ИК-112N је обављено 2014. године, што је било прво испитивање једног Е-буса у Републици Србији.

Главно истраживање је обављано на аутобусима са електричним погоном произвођача Хигер (Higer), модел KLQ6125GEV3 Electric, (Higer KLQ6125GEV3) који за складиштење електричне енергије користе суперкондезатор и раде на линији ЕКО 1 (Вуков споменик-Насеље Белвил) у Београду.

Научни циљеви истраживања који су реализовани у докторској дисертацији су:

- Упознавање са техничким специфичностима аутобуса на електрични погон и искуствима у експлоатацији у Европи и свету;
- Теоријска и емпиријска сазнања везана за енергетску ефикасност примене аутобуса на електрични погон у систему јавног градског транспорта путника;
- Добијање репрезентативних резултата потрошње и рекуперације електричне енергије аутобуса на електрични погон на основу мерења, сакупљањем и обрадом резултата коришћењем апликације за праћење рада аутобуса на електрични погон;
- Квантификација ефеката смањења емисије издувних гасова као последице увођења одређеног броја аутобуса на електрични погон и повлачење из експлоатације истог броја аутобуса са погоном на дизел гориво или КПП, на изабраној линији јавног градског транспорта;
- Поређење нивоа емисије емитоване буке аутобуса на електрични погон и аутобуса са погоном на дизел гориво и КПП;
- Поређење економских ефеката експлоатације аутобуса на електрични погон и аутобуса са погоном на дизел гориво и КПП;
- Моделирање возних циклуса и симулација рада аутобуса на електрични погон на градској линији. Израчунавање потрошње и рекуперације електричне енергије, примена на било којој линији при различитим сценаријима рада зависно од услова саобраћаја, путничких токова и конфигурације терена. Верификација модела поређењем резултата мерења и симулације;
- Допринос у публикавању научних радова и упознавања научне и стручне јавности са резултатима истраживања, који могу бити коришћени у дефинисању будућих стратегија развоја транспортних система градова (е-мобилност, одрживост, енергетска ефикасност, итд).

Докторска дисертација се заснива на хипотезама које су произашле из детаљног проучавања и упознавања техничких перформанси аутобуса на електрични погон и специфичности режима рада на линијама јавног градског транспорта:

**Хипотеза 1.** Аутобуси на електрични погон имају тренд повећања коришћења у системима јавног градског транспорта у многим градовима света.

**Хипотеза 2.** Аутобуси на електрични погон имају већу енергетску ефикасност у поређењу са аутобусима са погоном на дизел гориво и КПП, изражену у потрошеној енергији по јединици пређеног пута ( $\text{kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ ).

**Хипотеза 3.** Потрошња електричне енергије Е-буса је зависна од карактеристичног периода рада Е-буса на линији (јутарње и поподневно вршно оптерећење, међувршни период, вечерње оптерећење, први/задњи поласци) као последица различитих оптерећења Е-буса (број путника), превозне брзине,



геометријских карактеристика трасе линија (нагиб пута) и стила вожње. Потрошња електричне енергије Е-буса је изразито зависна од сезонског периода експлоатације Е-буса (пролећно-јесењи период, летњи период и зимски период) као последица некоришћења или коришћења система за грејање или хлађење возачевог и путничког простора возила.

**Хипотеза 4.** Смањење емисија штетних издувних гасова у градовима (локално загађење) ако се користе аутобуси на електрични погон уместо аутобуса са погоном на дизел гориво или КПП, посматрано кроз анализу "од резервоара до точка", TTW (Tank to Wheel), може се проценити. Аутобуси на електрични погон су еколошки прихватљивији од аутобуса на дизел гориво или КПП у погледу количине емисије угљен-диоксида (CO<sub>2</sub>), посматрано кроз анализу "од извора до точка", WTW (Well to Wheel). Аутобуси на електрични погон имају нижи ниво емитоване буке у поређењу са аутобусима са погоном на дизел гориво и КПП.

**Хипотеза 5.** Могуће је урадити моделирање и симулацију рада аутобуса на електрични погон за изабрани возни циклус као и за било коју линију јавног градског транспорта, узимајући у обзир све специфичности линије тако да добијени резултати потрошње и рекулперације електричне енергије имају висок степен подударности са резултатима непосредног мерења.

Наведене хипотезе дефинисале су правац и смернице истраживања у оквиру докторске дисертације. Основни задатак је био да се на основу експерименталних мерења помоћу расположиве мерне опреме, сакупљањем и обрадом резултата потрошње електричне енергије коришћењем апликације за праћење рада аутобуса на електрични погон добију репрезентативни и меродавни подаци о потрошњи и рекулперацији електричне енергије у зависности од појединих техничких и експлоатационих фактора. Циљ је био и да резултати моделирања и симулације рада аутобуса на изабраној линији јавног превоза имају висок степен подударности са измереним вредностима. У докторској дисертацији су, с обзиром на сложеност проблематике која је предмет истраживања, коришћене следеће истраживачке методе:

- Анализа литературе – теоретски део истраживања;
- Прикупљање резултата потрошње електричне енергије аутобуса на електрични погон у различитим режимима рада помоћу апликације за праћење рада возила;
- E-COPT, E-SORT (Standardised On Road Test Cycles for Electric Vehicles) методологија за мерење потрошње електричне енергије аутобуса на електрични погон;
- Статистичка обрада резултата;
- Експерименталне методе мерења помоћу мерне опреме;
- Методе мерења помоћу аквизиције података са КЕН, CAN (Controller Area Network) мреже аутобуса;
- Економске методе вредновања;
- СВОТ (SWOT<sup>1</sup>) анализа;
- Методе рачунарске симулације.

<sup>1</sup> SWOT (S-Strengths, W-Weaknesses, O-Opportunities, T-Threats)  
СВОТ (Предности, Слабости, Могућности, Изазови)

Теоријско истраживање обухватило је преглед и проучавање актуелне и компетентне, пре свега светске, литературе која се односи на аутобусе са електричним погоном и енергетску и еколошку ефикасност примене тих возила. Коришћењем апликације за праћење рада аутобуса на електрични погон у Београду омогућило је формирање базе података потрошње електричне енергије аутобуса на електрични погон посматрано у карактеристичним периодима дана и за карактеристичне месеце током године. Методологија E-SORT дефинише начин израчунавања потрошње на основу промене степена напуњености батерије или суперкондензатора. Обраде добијених резултата вршене су применом статистичких метода: методе обраде узорка, интервалне оцене узорка, регресије, корелације, тестирања хипотеза ( $\chi^2$  - тест) сагласности емпиријских и теоријских расподела и тест једнакости средњих вредности статистичких скупова. Експерименталне методе мерења помоћу мерне опреме реализоване су према плану мерења на изабраним линијама. Непосредним мерењем, поред укупне вредности потрошње и рекулперације електричне енергије која је остварена на једном полуобрту, мерена је и потрошња електричне енергије помоћних уређаја и система, као што су компресор за ваздух, пумпа управљача, системи за хлађење и грејање, потрошачи са ниско напонске мреже (осветљење, сигнализација, итд). Значај добијених резултата је у сагледавању појединачне заступљености потрошње електричне енергије помоћних уређаја у односу на укупну. У дисертацији је коришћена методологија UITP Environmental Cost Annex IV, за прорачун емисије штетних издувних гасова код аутобуса са погоном на дизел гориво и КППГ и емисије угљен-диоксида. Мерење нивоа буке код аутобуса на електрични погон рађено је на полигону сходно методологији према правилнику UN ECE 51.02 или Директиве (Directive 2007/34/EC).

Примена нових технологија, као што су аутобуси на електрични погон, подразумева и значајне инвестиционе трошкове, али ниже оперативне трошкове у поређењу са аутобусима са конвенционалним погоном. У економском вредновању урађена је анализа оправданости увођења аутобуса на електрични погон у поређењу са аутобусима са погоном дизел гориво и КППГ. У студији случаја коришћена је економска метода најмање нето садашње вредности укупних трошкова ( $\min T_{nsv}$ ) у животном веку возила. Истраживање предности, слабости, могућности и изазова примене овог новог концепта аутобуса за транспорт путника обрађено је SWOT анализом.

Моделирање и рачунарска симулација омогућила је различите сценарије режима рада аутобуса на електрични погон на полигону или у реалној експлоатацији на линији, који се односе на различита оптерећења са бројем путника, геометријске карактеристике трасе, саобраћајне услове, времена вожње између станица, времена стајања на станицама, рад помоћних уређаја, система за хлађење и система за грејање, који имају утицај на потрошњу електричне енергије. Израчунавање потрошње електричне енергије за погон возила базиран је на прорачуну снага потребних за кретање возила и ангажоване снаге рада помоћних уређаја. Прорачун електричне енергије рекулперације у фази кочења урађен је на основу перформанси рада електромотора у генераторском режиму рада. За симулацију рада аутобуса на електрични погон коришћен је програм MS Office-Excel 2007. Докторска дисертација је реализована кроз 11 поглавља и на крају је дат списак коришћене литературе.

**У поглављу 1, уводним разматрањима** дат је осврт на историјски приказ коришћења фосилних и алтернативних горива са проценом будућег коришћења, као и месту и улози транспортног сектора у укупној потрошњи енергије, емисији штетних гасова и емисији угљен-диоксида. Дате су и тенденције концепта развоја возила, посебно аутобуса за јавни градски транспорт. У уводу је описан: предмет, циљеви, основне хипотезе дисертације и методе истраживања.

**У поглављу 2** дат је приказ научних радова и истраживања која су рађена у Европи и свету а односе се на: потрошњу електричне енергије аутобуса на електрични погон, анализе регенеративног кочења и рекуперације, утицај рада система за грејање, хлађење и помоћних уређаја на возилу на укупну потрошњу електричне енергије возила, еколошке перформансе и поређење енергетске ефикасности са другим погонским системима који се примењују код аутобуса за јавни градски транспорт.

**У поглављу 3** описан је концепт аутобуса на електрични погон, односно карактеристике погонског електромотора, система регулације, контроле и управљања електричном енергијом, система складиштења електричне енергије, система за пуњење.

**У поглављу 4** дати су примери увођења аутобуса на електрични погон у системе јавног градског транспорта градова: Кине, Европе, Азије, Северне Америке, Јужне Америке и Аустралије. Дат је преглед актуелног тржишта аутобуса на електрични погон, односно најважнијих произвођача возила. Приказана је SWOT анализа којом се дефинишу предности, слабости, могућности и изазови када је примена аутобуса на електрични погон у питању.

**У поглављу 5** дате су основе теорије кретања и кочења специфичне за аутобусе на електрични погон, перформансе погонског система, процеса регенеративног кочења аутобуса и рекуперације електричне енергије у фази заустављања и кочења.

**У поглављу 6** дисертације представљена је методологија и резултати мерења потрошње електричне енергије аутобуса на електрични погон на изабраним линијама јавног градског транспорта у Београду, као и утврђивање утицаја појединих техничких и експлоатационих фактора на добијене вредности потрошње електричне енергије аутобуса. Резултати потрошње електричне енергије добијени су коришћењем методологије E-SORT, помоћу које се дефинише начин израчунавања потрошње на основу промене степена напуњености батерије или суперкондензатора и апликације за праћење рада аутобуса на електрични погон. База података потрошње електричне енергије аутобуса на електрични погон обухвата различите карактеристичне периоде рада возила током дана за карактеристичне сезонске периоде током године (пролећно-јесењи, летњи и зимски период) и омогућава на основу статистичке анализе извођење одређених корелација и зависности. Анализиран је и утицај стила вожње на вредности потрошње електричне енергије Е-буса.

**У поглављу 7** представљени су методологија и резултати мерења потрошње и рекуперације електричне енергије аутобуса на електрични погон у фази кочења на изабраним линијама, коришћењем мерне опреме и уређаја за аквизицију података са CAN мреже аутобуса на електрични погон.

**У поглављу 8** урађена је анализа еколошких предности примене аутобуса на електрични погон на градским линијама који се могу представити преко: ефеката смањења емисије издувних гасова, као последице замене аутобуса са погоном на дизел гориво и КППГ, аутобусима на електрични погон, повољнијом емисијом угљен-диоксида ( $\text{CO}_2$ ) у поређењу са аутобусима који користе дизел гориво или КППГ и нижим нивоом емитоване буке у поређењу са аутобусима са погоном на дизел гориво. Приказани су резултати примене одговарајућег модела за процену емисије издувних гасова на карактеристичној линији јавног градског транспорта, где су се користили аутобуси на електрични, дизел и КППГ погон. Представљени су и резултати мерења нивоа буке аутобуса на електрични погон помоћу мерне опреме на полигону. У оквиру еколошких утицаја рада аутобуса на електрични погон истражене су и специфичности рециклаже аутобуса на електрични погон.

**У поглављу 9** представљени су економски ефекти увођења и рада аутобуса на електрични погон. Дат је приказ и анализа: инвестиционих трошкова, оперативних трошкова који су обухватили трошкове електричне енергије, трошкове одржавања, трошкове екологије и остале трошкове. Поређење трошкова у животном веку аутобуса применом економских показатеља приказано је у студији случаја на примеру рада 50 аутобуса различитих погонских система.

**У поглављу 10** урађено је моделирање и симулација рада аутобуса на електрични погон на полигону и линијама јавног градског транспорта. Дат је приказ и поређење са резултатима експерименталних мерења.

**У поглављу 11** дата су закључна разматрања везано за истраживања енергетских и еколошких перформанси аутобуса на електрични погон који раде у систему јавног градског транспорта. Дат је приказ научног доприноса истраживања која су обухваћена дисертацијом и предлог будућих праваца истраживања.

**У поглављу ЛИТЕРАТУРА** дат је приказ коришћене литературе према реду појављивања у тексту дисертације.

## 2. ПРЕГЛЕД НАУЧНИХ РАДОВА И ИСТРАЖИВАЊА ИЗ ОБЛАСТИ ЕНЕРГЕТСКЕ ЕФИКАСНОСТИ И ЕКОЛОШКИХ ПЕРФОРМАНСИ АУТОБУСА НА ЕЛЕКТРИЧНИ ПОГОН

Прва истраживања из области енергетске ефикасности односила су се на аутобусе са хибридном погоном (дизел-електричним) када су радили у електро режиму или у фази кочења. Анализирана је рекулпација (регенерација) електричне енергије. Један од првих радова датира из 1997. године када су Викс (Wicks) и Донели (Donnelly) истраживали горњу границу искоришћења регенеративног кочења на једном аутобусу са хибридном погоном који је радио у међуградском транспорту, где се возни циклус битно разликовао од типичног циклуса у јавном градском транспорту. Истраживање је показало да електромотор у генераторском режиму може регенерисати 59% кинетичке енергије које возило има у фази кочења у електричну енергију [22]. Лин Чан Чао (Lin Chan Chiao) са сарадницима предлаже интегрисани модел за хибридно комерцијално возило који се заснива на оптимизацији алгорита за контролу управљања електро и дизел мотора чиме се постиже рад дизел мотора у оптималном подручју рада, а електромотор у подручју максималне ефикасности. Резултати симулације показали су да код овог типа возила може да се оствари смањење потрошње дизел горива између 20% и 30% [23]. Сиканик и Бејли (Sikanek & Bailey) баве се регенеративним кочењем код хибридних возила са циљем да се добије оптимална енергија рекулпације у зависности од сложених услова рада. Они су дали детаљан опис алгорита регенеративног кочења који се односи на модел хибридног возила [24].

На примеру симулације рада 12-метарског (стандардног) градског аутобуса са хибридном паралелним погоном према задатом Кинеском градском возном циклусу (Chinese urban bus driving cycle), Џанг Жонжи (Zhang Junzhi) је истраживао ефикасност енергије рекулпације у фази кочења у односу на кинетичку енергију возила [25]. У раду се анализирају различите стратегије контроле управљања регенеративним кочењем. У истраживању се дошло до резултата да је код серијске контроле управљања регенеративним кочењем ефикасност рекулпације 55,89%, код потпуно паралелне контроле управљања (Parallel I) ефикасност рекулпације износила је 22,68%, а код делимично паралелне контроле управљања (Parallel II) ефикасност рекулпације износила је 63,86%. Серијска контрола управљања регенеративног кочења са аспеката стабилности возила показала је боље резултате. Зилин Ма (Zilin Ma) урадио је истраживање [26] где је коришћен градски аутобус са хибридном паралелним погоном кинеског произвођача Голден Драгон (Golden Dragon Bus Company) и добио приближне резултате ефикасности енергије рекулпације у фази кочења у односу на кинетичку енергију возила као у претходно наведеном истраживању. Истраживање ефеката регенеративног кочења у случају кретања аутобуса на електрични погон са повећаном аутономијом у режиму успорења по инерцији без активирања кочног система возила урађено је у симулацији [27] аутора Чој Џондаи (Choi Jongdai). При достизању брзине кретања аутобуса од  $87 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , возило се кретало по инерцији у трајању од 20 s. У случају без регенеративног кочења после 20 s возило је имало брзину  $72 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . Степен напуњености батерије, SOC (State of charge battery) имао је константну вредност током трајања успорења у износу од 87,1%. Када се користи регенеративно кочење после 20 s, брзина возила је смањена на  $60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , а степен напуњености батерије је повећан на

87,4% тако да постоји ефекат рекуперације електричне енергије у износу од 0,3% SOC што је око 0,36 Ah. Поређење енергетске ефикасности аутобуса са погоном на дизел гориво и аутобуса са серијским хибридном погоном представљено је у раду Канапура (Khanipour) [28]. Симулација потрошње погонске енергије за оба типа аутобуса рађена је према CBD14 возном циклусу. Добијени су резултати потрошње аутобуса са погоном на дизел гориво од  $49,3 \text{ L} \cdot (100\text{km})^{-1}$ , док је потрошња дизел горива код аутобуса са серијским хибридном погоном била за 40% мања и износила је  $29,5 \text{ L} \cdot (100\text{km})^{-1}$ . Ефикасност регенеративног кочења код аутобуса на хибридни погон у зависности од различитих коефицијената приањања пнеуматика и подлоге (асфалтна подлога, лед, блато, макадам) и остварених сила кочења на пнеуматичима управљачке и погонске осовине, објавио је Лианг Ли (Liang Li) са сарадницима. Резултати симулације регенеративног кочења при различитим подлогама показали су да је најмања ефикасност на путној подлози од шљунка 6,19%, на залеђеном путу 12,37%, док у нормалним условима на асфалтној подлози достиже 52,13% [29].

Алгоритам контроле и управљања регенеративним кочењем код аутобуса са хибридном погоном представљен је у раду Чонпенга (Zhongpeng) са сарадницима [30]. Алгоритам описује систем: возач - расподела кочних сила - анти блокирајући систем - притисак у пнеуматском кочном систему - напуњеност батерије. Код аутобуса са хибридном и електричним погоном кочни систем возила чине пнеуматски систем и систем регенеративног кочења. Контрола, управљање и синхронизација ова два система и ефекти на рекуперацију електричне енергије приказани су у раду Сангтераша (Sangtarash) са сарадницима [31]. Симулација је рађена за неоптерећен градски стандардни аутобус са серијским хибридном погоном, према Нуремберг Р36 возном циклусу (Nuremberg R36 drive cycle). Симулирана су три случаја контроле управљања регенеративног кочења: серијски, паралелни II и паралелни I. Добијени су резултати симулације ефикасности рекуперације електричне енергије у односу на кинетичку енергију возила у фази кочења респективно од: 50%, 54% и 22%.

У студији случаја аутора Бареро (Barrero) са сарадницима [32], која је рађена за аутобус са серијским хибридном погоном Мерцедес Цито 0520 (Mercedes Cito 0520) са системом складиштења електричне енергије помоћу суперкондензатора, симулиран је Холандски Урбани Циклус, DUBC (Dutch urban cycle). Смањење потрошње дизел горива код серијског хибрида у односу на дизел аутобус идентичних перформанси износила је 32%, а у случају да је аутобус са хибридном погоном користио старт-стоп систем потрошња горива је била мања за 44%. Ефикасност рекуперације у фази кочења достигала је вредности између 60÷65%. Један број истраживања и научних радова који су се односили на енергетске перформансе потпуно електричних возила (путничких и лаких комерцијалних возила), која су почела да се користе у Кини, пре аутобуса на потпуно електрични погон, објављен је у радовима [33, 34, 35], где је препознат потенцијал искоришћења кинетичке енергије возила у фази кочења у функцији расподеле сила кочење, стабилности возила и могућности повраћаја електричне енергије у батерије возила. Слична истраживања [36,37] су рађена и у Европи.

У докторској дисертацији [38] Грбовић је истраживао могућности коришћења суперкондензатора као система за складиштење електричне енергије код возила. Кроз симулације и непосредна мерења доказао је да суперкондензатори могу у

трајању од 10÷15 s, током кочења возила, да апсорбују више од 95% електричне енергије настале у погонском електромотору када ради као генератор.

Од 2008. године, када су се аутобуси на потпуно електрични погон почели користити у Кини и Европи, постоје истраживања и објављени радови који се односе искључиво на овај тип погонске конфигурације градског аутобуса. Приметан је све већи број објављених радова који се односе на научну област истраживања потпуно електричног аутобуса са аспекта енергетских и еколошких аспеката коришћења. У студији из 2012. године [39], која је анализирала емисију угљен-диоксида, потрошњу енергије и ниво емитоване буке за стандардне градске аутобусе са погоном на дизел гориво, КПГ, хибридним и потпуно електричним погоном која је обухватила више од 40 партнера из Европске уније (произвођаче возила, превознике, институције) показала је да су аутобуси на потпуно електрични погон имали емисију угљен-диоксида између 1.050÷1.150 g·km<sup>-1</sup>, посматрано од "извора до точка" (Well to Wheel) и емитовали су ниво буке од 67 dB. Аутобуси са погоном на дизел гориво остваривали су емисију угљен диоксида од 1.350 g·km<sup>-1</sup> и имали су ниво буке од 80 dB.

Једно од првих истраживања енергетских и еколошких перформанси примене код потпуно електричног аутобуса спроведено је у Ротердаму [40], где је у периоду 2009-2012. година, тестиран стандардни 12-метарски ВДЛ Цитеа Е-бус (VDL Citea E-bus) на градској линији број 46. У зависности од оптерећења возила (празно-пуно), потрошња електричне енергије је износила од 1,15÷1,4 kWh·km<sup>-1</sup>. Однос вредности електричне енергије која је враћена у батерију у односу на преузету енергију из батерије потребну за кретање и рад помоћних уређаја достигала је 28%. Е-бус је у раду емитовао буку у распону од 67÷73 dB.

У раду Перота (Perrotta) и сарадника истраживане су могућности рекуперације електричне енергије за два различита возна циклуса и два различита система складиштења електричне енергије за Кетано електрични аутобус (Caetano E-bus) [41]. У првом случају симулиран је рад аутобуса када је опремљен литијум-ферофосфатном батеријом (LFP) капацитета 172 kWh и максималном јачином струје пуњења батерије од 200 А. У другом случају возило је било опремљено суперкондензатором капацитета 63 F и максималном јачином струје пуњења од 240 А. Симулиран је Њујорк градски циклус, NYCC (New York City Cycle) и градски динамометар возни циклус, UDDS (Urban Dynamometer Driving Schedule).

У Њујорк градском циклусу аутобус на електрични погон за кретање и рад помоћних уређаја потрошио је 3,25 kWh електричне енергије а електромотор у генераторском режиму рада генерисао је 0,69 kWh електричне енергије, што је 21% од потрошене електричне енергије. У градском динамометар возном циклусу за кретање и рад помоћних уређаја утрошено је 16,41 kWh електричне енергије а генерисано је 4,06 kWh, што чини 24% од потрошене електричне енергије по симулираном возном циклусу. Ванг (Wang) са сарадницима је истраживао ефекте регенеративног кочења код стандардног градског аутобуса на електрични погон [42]. Вредност регенеративног кочног момента на погонској осовини одређена је брзином возила, перформансама електромотора, степеном напуњености батерије, расподелом силе кочења између управљачке и погонске осовине и вредностима коефицијента кочења (однос укупне силе кочења и тежине возиле). Симулиране су вредности брзине возила од 40 km·h<sup>-1</sup> и 70 km·h<sup>-1</sup>, степен напуњености батерије (SOC 50% и 70%) и различите вредности коефицијента кочења 0,1; 0,2; 0,4; 0,9.

Симулирана су три возна циклуса: Кинески типични градски циклус (China typical city cycle), Лондон аутобуски циклус (London bus cycle) и Пекинг градски циклус (Beijing transit cycle). Резултати симулације ефеката регенеративног кочења односно рекуперације електричне енергије имају највећу вредност код Лондон аутобуског циклуса где је возило са рекуперацијом прешло 118,3 km а без рекуперације 79,0 km.

Значајан допринос истраживању енергетских перформанси код аутобуса на потпуно електрични погон дат је у истраживању Путца (Pütz) са сарадницима које је обављено у Софији (Бугарска) на Е-бусу Хигер (Higer KLQ6-A6L) који је користио суперкондензатор за складиштење електричне енергије [43]. Истраживање је обављено у реалним условима експлоатације на градској линији. Возило је било оптерећено са 22 путника, што је око 25% капацитета возила. Према овом истраживању, просечна потрошња електричне енергије износила је  $0,95 \text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ . Електрична енергија која је враћена у суперкондензатор износила је 40,8 kWh, што је 32,2% од укупно преузете енергије од 125,34 kWh из суперкондензатора која је потрошена на кретање возила, рад помоћних уређаја и нисконапонску инсталацију. У истраживању је анализирана дистрибуција потрошене електричне енергије: погонски мотори 67,8%, помоћни уређаји 12,3%, нисконапонска инсталација 5,7%, електрични губици 14%.

У истраживању које је радио VTT Technical Research Centre of Finland, аутори Еркила (Erkkila) и Ни Лунд (NyLund) [44], анализирана је потрошња електричне енергије за аутобус на електрични погон према задатим градским возним циклусима који се често срећу приликом моделирања рада аутобуса на електрични погон: Брауншвајг возни циклус (Braunschweig driving cycle), Лондон возни циклус и Њујорк градски циклус. Укупна потрошња електричне енергије оптерећеног возила добијена симулацијом Брауншвајг возним циклусом износила је 9,3 kWh. Дистрибуција потрошње електричне енергије возила била је: 73,6% на погонски електромотор и инвертор рачунајући и губитке од чега 35,2% за савлађивање отпора котрљања и инерције, 10,4% аеро-динамички отпор; 7,9% рад компресора; 4,2% рад пумпе управљача; 8,2% унутрашњи губици у батерији, 4,5% механички губици; 1,6% губици у нисконапонској инсталацији. У студији из 2014. године [45] коју је урадила консултантска кућа Грутер (Grütter Consulting) дато је поређење енергетске ефикасности, емисије угљен-диоксида, инвестиционих и оперативних трошкова различитих погонских система који се користе код аутобуса за градски превоз: дизел, КПП, хибридни погон и потпуно електрични погон. Поређење енергетске ефикасности стандардног градског аутобуса на електрични погон и аутобуса са погоном на дизел гориво на примеру кинеског града Ченџоу (Zhengzhou) доказана је значајно већа енергетска ефикасност Е-буса. Просечна потрошња енергије Е-буса износила је  $1,0 \text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ , док је потрошња енергије аутобуса са погоном на дизел гориво била  $4,0 \text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ . Емисија угљен диоксида посматрана од "извора до циља" (WTW) била је код аутобуса на електрични погон  $720\text{-}790 \text{ g}\cdot\text{km}^{-1}$ , док је аутобус са погоном на дизел гориво имао емисију од  $1311 \text{ g}\cdot\text{km}^{-1}$ , што је више за око 45%. У раду Ксио Шан (Xiao-Chuan) са сарадницима анализирани су појединачно електричне компоненте аутобуса на електрични погон са аспекта њихове ефикасности и губитака који су присутни током рада [46]. Израда симулационог модела аутобуса на електрични погон, симулација рада на примеру линије бр. 11 у Финском граду Еспо и поређење са резултатима мерења добијених на ваљцима где је симулиран возни циклус на



линији бр. 11 објављени су у раду Халмеаха (Halmeaho) са сарадницима [47]. Добијени су резултати потрошене електричне енергије од 5,38 kWh симулацијом и 5,30 kWh мерењем на ваљцима. Висока усаглашеност резултата симулације и измерених вредности потврђује да приказани модел може са високом тачношћу да симулира рад електричног аутобуса на било којој линији.

Истраживање примене аутобуса на потпуно електрични погон у јавном градском транспорту путника предмет су истраживања Варге (Varga) [48]. Користећи симулациони програм АВЛ Круз (AVL Cruise), за одабрани градски возни циклус, UDC (Urban Drive Cycle) симулиран је рад стандардног градског аутобуса на електрични погон. Укупна потрошена енергија из батерије је 15 kWh. У батерију је рекупирано 5 kWh електричне енергије, односно сведено по пређеном путу потрошња је  $1,19 \text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ . Расподела потрошене електричне енергије је: 79% погонски електромотор и инвертор, са губицима за савлађивање свих отпора кретања, 12% механички губици, 5% помоћни уређаји и 4% губитак у батерији.

У раду Кима (Kim) са сарадницима мерена је потрошња електричне енергије аутобуса на електрични погон у реалним условима рада на градској линији у граду Поханг (Pohang) у Јужној Кореји [49]. На основу резултата промене степена напуњености батерије SOC са 84,4% на 44,1%, потрошено је 21,77 kWh електричне енергије, просечно  $1,11 \text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ . У раду су приказани и резултати мерења потрошње електричне енергије система за хлађење путничког простора возила и компресора за производњу компримованог ваздуха за кочни систем и ослањање.

Мерење потрошње енергије код стандардног градског аутобуса на потпуно електрични погон BYD E12, аутобуса са погоном на дизел гориво Икарбус, ИК-112N и тролејбуса БКМ-321 у Београду на градској линији бр. 41 и поређење енергетске ефикасности код испитиваних возила објављено је у раду [50]. Слично истраживање у Београду спроведено је на линији ЕКО 1, где су поређене потрошње погонске енергије за стандардни градски аутобус на електрични погон Higer KLQ6125GEV3 и стандардног градског аутобус са погоном на компримовани природни гас Ивеко Урбанвеј-КПГ (Iveco Urbanway-CNG) [51]. Просечна потрошња аутобуса на електрични погон износила је  $1,286 \text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$  а аутобуса са погоном на КПГ  $6,808 \text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ . Мерење рекулације електричне енергије код аутобуса на електрични погон Higer KLQ6125GEV3 и утицај конфигурације трасе на потрошњу електричне енергије на градској линији бр. 29 у Београду саопштено је у раду [52]. У смеру кретања Е-буса са изразитим успонима просечна потрошња неоптерећеног возила била је  $1,444 \text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$  док је у супротном смеру кретања просечна потрошња износила  $0,886 \text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ . Утицај стила вожње Е-буса Higer KLQ6125GEV3 на испитном полигону и линији ЕКО 1 у Београду урађено је у истраживању Благојевића са сарадницима [53]. Доказано је да препоручени енергетски ефикасни стил вожње може утицати на смањење потрошње електричне енергије Е-буса на линији ЕКО 1 између 31,1% и 35,2% у односу на "агресивни" стил вожње.

У Сједињеним Америчким Државама анализу рада градских аутобуса на електрични погон произвођача Протера (Protera) са аспекта енергетске ефикасности и поређење са аутобусима са погоном на КПГ дат је у извештају Националне лабораторије за обновљиве изворе, NREL (National Renewable Energy Laboratory) који је урадио Иди (Eudy) са сарадницима [54]. Анализиран је рад 12 аутобуса на електрични погон и 8 аутобуса са погоном на КПГ. Потрошња енергије

сведена по једној миљи за електрични аутобус износила је 2,15 kWh. У студији из 2016. године [55], аутора Абера (Aber) са Колумбија Универзитета (Columbia University) урађена је студија случаја замене свих аутобуса са погоном на дизел гориво, хибридни и КПП погон у Њујорку са аутобусима на потпуно електрични погон и очекиваних ефеката смањења емисије угљен-диоксида. У систему јавног транспорта путника у Њујорку је у раду 5.761 аутобуса од чега 1.503 стандардних и 801 зглобни аутобуса са погоном на дизел гориво, 747 стандардних аутобуса на КПП погон, 1.672 стандардних аутобуса на хибридни погон и 1.038 аутобуса са погоном на дизел гориво дужине 13,5 m. Ови аутобуси су у 2015. години проузроковали емисију угљен-диоксида (CO<sub>2</sub>) од 577.293 Mt. Ако се усвоји да је просечна потрошња електричне енергије стандардног аутобуса на електрични погон 2 kWh·miles<sup>-1</sup>, увођењем у рад 5.761 аутобуса на електрични погон, емисија CO<sub>2</sub> би износила 568.171 Mt на годишњем нивоу што би било смањење од 91,22 Mt у поређењу са 2015. годином.

Мерења потрошње погонске енергије помоћу мерне опреме за стандардни градски аутобусе са погоном на дизел гориво, КПП и електрични погон приказано је у раду Ђиса (Gis) са сарадницима [56]. Вршено је полигонско испитивање потрошње енергије према SORT 2, SORT 2 (Standardised On-Road Test Cycles) возном циклусу и методологији испитивања. Измерене су следеће вредности потрошње: аутобус на електрични погон 0,95 kWh·km<sup>-1</sup>; аутобус са погоном на дизел гориво 3,90 kWh·km<sup>-1</sup>; аутобус са погоном на КПП 4,98 kWh·km<sup>-1</sup>. У мастер раду, који је одбрањен на Алто Универзитету у Финској (Aalto University) 2017. године [57], истраживана је потрошња електричне енергије аутобуса на електрични погон у зависности од оптерећења возила, односно броја путника. Оптерећење у реалном возном циклусу је симулирано помоћу случајних бројева методом Монте Карло (Monte Carlo). Резултат је показао да потрошња електричне енергије са максималним оптерећењем које се јавља у вршним периодима рада аутобуса може бити већи за 26,3% у односу на периоде рада са минималним бројем путника.

Развој симулационог модела који обухвата што већи број утицајних фактора на потрошњу електричне енергије код аутобуса на електрични погон приказан је у раду Вепсалиниена (Vepsäläinen) са сарадницима [58]. Анализирани су утицаји броја заустављања возила током рада на линији, утицај стила вожње, саобраћајни услови, топографске карактеристике трасе у случајевима најповољнијих и најнеповољнијих сценарија. Показало се да потрошња код стандардног аутобуса на електрични погон зависно од случаја може варирати од 0,70÷1,34 kWh·km<sup>-1</sup>.

Примена овог симулационог модела објављена је у раду Кивекаса (Kivekäs) [59] где је на примеру линије бр. 11 у Финском граду Еспо вршена симулација аутобуса са различитим погонским системима. Добијени су резултати потрошње од 0,804 kWh·km<sup>-1</sup> за Е-бус; 3,592 kWh·km<sup>-1</sup> за аутобус са погоном на дизел гориво и 4,103 kWh·km<sup>-1</sup> за аутобус са погоном на КПП.

Истраживање оптималне потрошње електричне енергије аутобуса на електрични погон на трајекторији дужине 100 m, добијене симулацијом коришћењем метода Белмановог динамичког програмирања (Bellman's dynamic programming method) представљено је у раду Котиева и сарадника [60]. За потребе симулације и реалног мерења потрошње електричне енергије коришћен је електрични аутобус ЛИАЗ

5292.30. Оптимална потрошена електрична енергија за један возни циклус добијена симулацијом износи 238 кЈ.

Потенцијал коришћења соларне енергије и добијање електричне енергије помоћу фотонапонски колектора ради пуњења аутобуса на електрични погон приказано је у раду Матса (Mattes) и сарадника [61]. Фотонапонски колектор који је постављен у оквиру лабораторије истраживачког центра у Санта Катарини у Бразилу у периоду од марта 2017 до октобра 2017. године произвео је просечно дневно 60,52 kWh електричне енергије. Како је просечна дневна потрошња електричне енергије Е-буса у периоду март-октобар 2017. године 45,39 kWh, произилази да је то 75% од остварене производње струје преко фото напонског колектора.

Истраживање емисије угљен-диоксида аутобуса на електрични погон зависно од начина производње електричне енергије и поређење са аутобусом који користи дизел гориво и аутобуса који користи КПП дат је у раду Томића са сарадницима [62]. Анализиран је случај производње електричне енергије у Републици Србији и експлоатација аутобуса на електрични погон, са погоном на дизел гориво и погоном на КПП у Београду и Новом Саду. Генерално аутобус на електрични погон има мању емисију угљен-диоксида посматрано од "извора до точка" (WTW) у поређењу са аутобусом који за погон користи дизел гориво. Међутим у зимском периоду, када се на возилу користи електрични систем за грејање путничког простора, значајно се повећава укупна потрошња електричне енергије Е-буса, тако да се у тим условима емисија угљен-диоксида Е-буса изједначава са емисијом угљен-диоксида аутобуса са погоном на дизел гориво.

Анализа емисије угљен-диоксида посматрано од "извора до точка" (WTW) за електрична возила, начин производње електричне енергије (термоелектране, хидроелектране и нуклеарна постројења), ефикасност производње, губици у преносу електричне енергије предмет су рада Скрућанија (Skrúcaný) са сарадницима [63]. У раду је приказан пример емисије угљен-диоксида за транспортни сектор у државама Чешкој и Словачкој. Утицај рада система за грејање и хлађење возила на потрошњу електричне енергије код Е-буса у Београду на линији ЕКО 1 представљени су у радовима [64,65,66]. У екстремним зимским условима рада укупна потрошња електричне енергије Е-буса је дупло већа у поређењу са периодом када се не користи систем за грејање путничког простора. Слична истраживања обављена су у Немачкој што је приказано у радовима [67,68,69,70,71,72] у Бриселу [73] и Барселони [74] где је потврђен значајан утицај рада система за грејање и хлађење возила на енергетску ефикасност Е-буса.

### 3. КОНЦЕПТ АУТОБУСА НА ЕЛЕКТРИЧНИ ПОГОН

#### 3.1 Историјски приказ развоја аутобуса на електрични погон

Примена електричне енергије за погон друмских возила познат је концепт још од 1881. године када је Тров (Trouvé) у Француској конструисао прво електрично друмско возило [75]. Слично возило саградио је и Паркер (Parker) у Енглеској 1884. године [76]. Значајан напредак код електричних возила допринео је проналазак алкалне батерије коју је 1899. године патентирао Јунгер (Junger). Примена овог патента успешно је представљена у електричном возилу из 1900. године у Стокхолму [77]. Прво комерцијално електрично возило било је Морис и Салом'с Електобот (Morris and Salom's Electrobat) из 1901. године, које је коришћено као такси возило у Њујорку. Може се сматрати да је ово такси возило било и прво возило намењено за сврху јавног транспорта путника [77].

Концепт аутобуса за јавни градски транспорт са електричним погоном први пут је представљен 1969. године у Франкфурту, када је Мерцедес-Бенц (Mercedes-Benz) представио први хибридни, дизел-електрични испитни аутобус. Све до 1979. године трајала су пробна тестирања и стална унапређивања хибридног концепта погона код аутобуса за градски превоз, да би 1979. године укупно 13 соло градских дизел-електричних аутобуса Mercedes-Benz OE 305, било на петогодишњем тестирању у редовном саобраћају [78].

Већ 1982. године немачки произвођач аутобуса МАН (MAN), произвео је аутобус MAN SL-E200 који је имао искључиво електрични погон, што се може сматрати и првим моделом аутобуса са потпуним електричним погоном. Овај тип аутобуса вукао је приколицу на којој су били акумулатори (слика 3.1) [79].



Слика 3.1 MAN SL-E200 [79]

Примена овог концепта била је неодржива због изузетно велике масе возила, мале аутономије кретања, као последице малог капацитета батерија (акумулатора), дугог времена пуњења и неопходне замене батерија (акумулатора) на терминусима. Увођење аутобуса са хибридним погоном, представљало је прву фазу примене електричног погона. Прва примена дизел-електричних градских аутобуса у Јапану почела је 1991. године, када је произвођач Хино (Hino) испоручио аутобусе у осам градова. У САД и Канади од 1997. године постојала је значајнија примена дизел-електричних аутобуса тако да је њихов број у 2010. години износио 6.300, чиме су постали лидери у коришћењу овог типа аутобуса [16]. У Европи значајније увођење аутобуса на хибридни погон бележи се од 2006. године када је Лондон набавио 56 хибридних аутобуса. Од тад и други европски

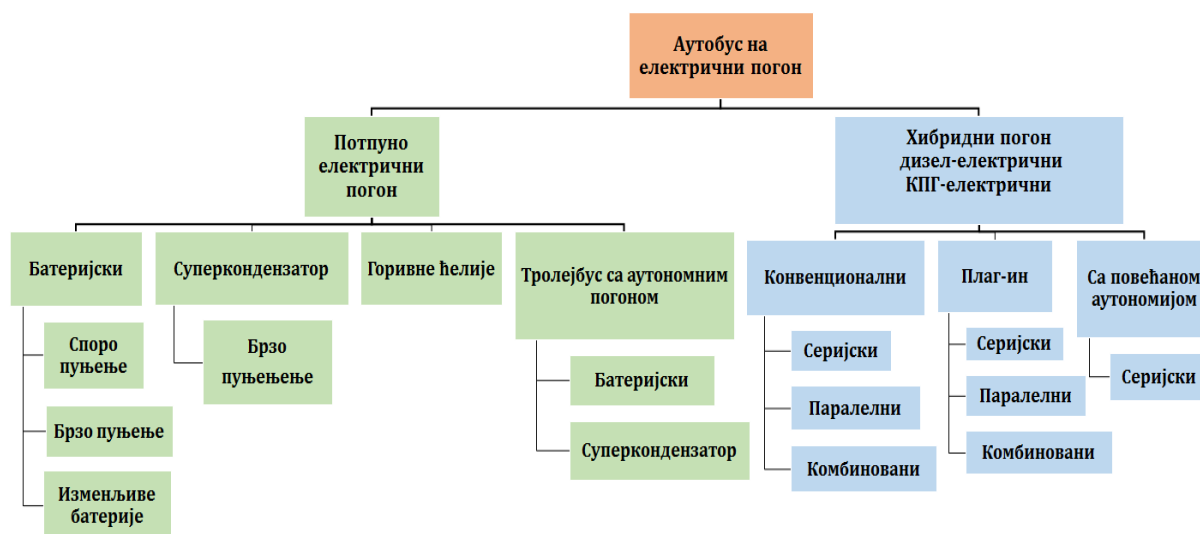
градови започели су увођење у рад хибридних аутобуса, тако да је у 2012. години било у експлоатацији око 1.191 аутобуса [16].

За почетак коришћења аутобуса на потпуно електрични погон, као новог концепта у систему јавног градског транспорта, сматра се 28.08.2006. године, када се у Шангају (Shanghai) у Кини на линији бр. 11, кренуло са експлоатацијом овог концепта градских аутобуса [80]. Кинески произвођач аутобуса ХИГЕР (HIGER) произвео је стандардни градски аутобус који је користио суперкондензатор за складиштење електричне енергије произвођача АОВЕИ (AOWEI). Допуњавање суперкондензатора вршено је на свакој станици за време док је аутобус стајао. На овај начин аутономија кретања била је ограничена на једно међустанично растојање. Од тад па до данашњег времена, убрзани развој технологије складиштења електричне енергије помоћу батерија и суперкондензатора и развој система за брзо пуњење допринели су да концепт електричног аутобуса у последњих неколико година буде све више присутан у многим европским и светским градовима.

Може се сматрати да концепт електричног погона данас има највећу могућност и оправданост примене код аутобуса који се користе у систему јавног градског транспорта, с обзиром да су перформансе аутобуса на електрични погон са аспекта експлоатационих захтева (аутономија, капацитет, време пуњења) достигле тај ниво да могу да буду успешна замена за аутобусе са конвенционалним погоном.

### 3.2 Конфигурације погона код аутобуса на електрични погон

Аутобуси на електрични погон, Е-бус, (Electric Bus, E-bus) представљају све врсте аутобуса који имају електромотор као погонски агрегат, било као примарни и једини (потпуно електрични, горивне ћелије, тролејбус са аутономним погоном опремљен батеријама) или као хибридни у комбинацији са другим типом погона (најчешће са СУС мотором који користи дизел гориво или КППГ). На слици 3.2 приказане су типичне конфигурације погона и начини пуњења код аутобуса на електрични погон.



Слика 3.2 Конфигурације погона и начина пуњења код аутобуса на електрични погон

### 3.2.1 Аутобуси са потпуно електричним погоном

Аутобуси са потпуно електричним погоном, FEB (Full Electric Bus) представљају аутобусе који имају искључиво електрични погон помоћу једног или два електромотора, аутономно кретање помоћу сопственог извора електричне енергије и систем за пуњење електричном енергијом.

У литератури и пракси овај тип електричног аутобуса често се још назива "чист" електрични аутобус, PEB (Pure Electric Bus). Типични представници овог типа електричног аутобуса су: батеријски, са суперкондензатором, са горивним ћелијама и тролејбус са аутономним погоном који се обезбеђује из сопственог система складиштења електричне енергије.

Предности овог типа погона у односу на друге погонске системе је висока енергетска ефикасност погонског мотора, изванредне вучно-динамичке карактеристике, рекулерација електричне енергије у фази кочења, тих рад односно низак ниво емитоване буке. У табели 3.1 дата су поређења енергетске ефикасности код различитих погонских система који се данас користе код аутобуса за јавни градски транспорт, изражено у kWh·(100km)<sup>-1</sup> посматрана на нивоу возила [81,82].

Табела 3.1 Поређење енергетске ефикасности аутобуса различитих погонских система за 12 т аутобус (стандардни градски аутобус)

| Врста погонског система                     | Енергетска ефикасност, kWh·(100km) <sup>-1</sup> |
|---|--|
| <b>Потпуно електрични</b>                   | <b>119-140</b>                                   |
| Плаг-ин (Plug-in) хибрид (дизел-електрични) | 260  |
| Хибрид (дизел-електрични)                   | 283-380  |
| Дизел                                       | 500  |
| Компримовани природни гас (КПГ)             | 655  |

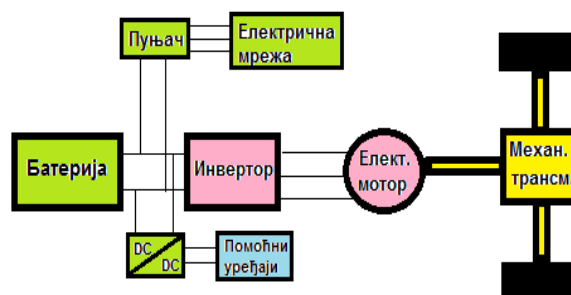
Из табеле се може закључити да су аутобуси на потпуно електрични погон значајно ефикаснији од аутобуса на хибридни погон и вишеструко ефикаснији од аутобуса са погоном на дизел гориво. То је последица већег коефицијента корисног дејства који је присутан у раду електромотора, у поређењу са моторима са унутрашњим сагоревањем [83]. Такође аутобус са електричним погоном током фазе кочења, док електрични мотор ради у генераторском режиму, производи електричну енергију која се складишти у батеријама или суперкондензаторима.

Аутобуси који за погон користе компримовани природни гас су најмање енергетски ефикасни од свих типова погона који су поређени с обзиром да погонски СУС мотори овог типа погона раде по ОТО циклусу, који има мањи степен корисног дејства од дизел и електричног погона.

Посматрано на локалном нивоу сви типови потпуно електричног аутобуса имају нулту емисију загађења и емисију CO<sub>2</sub>. На глобалном нивоу, зависно од начина производње електричне енергије, емисија CO<sub>2</sub> може бити различита. Ако се користе обновљиви извори она је минимална док приликом добијања електричне енергије у термоелектранама сагоревањем угља она је значајније присутна.

### 3.2.2 Аутобуси на електрични погон са батеријама

С обзиром да су батерије најзаступљенији систем складиштења електричне енергије овај тип електричног аутобуса често се назива електрични аутобус на батерије, ВЕВ (Battery Electric Bus). Конфигурација електричног аутобуса са батеријама представљена је на слици 3.3.



Слика 3.3 Конфигурација електричног аутобуса са батеријама

Аутобус на електрични погон са батеријама састоји се од сета батерија за складиштење електричне енергије, инвертора, погонског електромотора, претварача једносмерне струје DC-DC, помоћних уређаја, механичке трансмисије и пуњача који може бити интегрисан у возилу или спољне изведбе. Батерија се пуни преко пуњача који је повезан на електричну мрежу. Инвертор има улогу да претвори једносмерну струју из батерије у наизменичну струју и испоручи је у погонски електромотор у режиму погона. Када возило кочи настаје електрична енергија рекуперације у електромотору тако да инвертор наизменичну струју претвара у једносмерну и складишти у батерију. Претварачи једносмерне струје усклађују потребни напон за рад помоћних уређаја на возилу у односу на високи напон у батерији који је око 600 V.

Систем за пуњење електричног аутобуса је преко "плаг-ин" (plug-in) конектора или пантографа. Зависно од типа постоје електрични аутобуси који се пуне преко ноћи у депоу или према потреби током рада. Пуњење током рада обавља се на терминалима (терминалима) током редовног задржавања возила приликом промене смера кретања [84]. У зависности од капацитета батерија код аутобуса који се пуне преко ноћи аутономија кретања на дневном нивоу најчешће је између 150÷250 km, док код варијанте пуњења на терминалу (терминалу) аутономија кретања је најчешће између 40÷60 km.

### 3.2.3 Аутобуси на електрични погон са суперкондензаторима

Систем за складиштење електричне енергије може бити и кондензатор високог капацитета, суперкондензатор или како се још назива ултракондензатор (ultracapacitor). У литератури овај тип електричног аутобуса се назива електрични аутобус са суперкондензатором, UCEB (Ultracapacitor Electric Bus). Ретке су изведбе аутобуса са потпуно електричним погоном који користе оба система складиштења. Конфигурација електричног аутобуса са суперкондензатором је

идентична конфигурацији као код батеријског аутобуса, само је разлика у систему складиштења електричне енергије. Е-бус са суперкондензаторима искључиво се користи на линијама које имају инфраструктуру за брзо пуњење где се допуњавање врши најчешће на терминусима или неким станицама дуж трасе линије, током задржавања због уласка и изласка путника. На терминусима пуњење траје између 5÷10 минута а на станицама између 20÷30 секунди.

С обзиром да суперкондензатори имају значајно мању количину акумулиране електричне енергије у поређењу са батеријама, аутономија кретања овог типа електричног аутобуса је најчешће између 15÷30 km. Блок шема конфигурације аутобуса на електрични погон са суперкондензатором Higer KLQ6125GEV3 приказана је у Прилогу 1 [85].

Систем за пуњење електричног аутобуса са суперкондензатором се најчешће реализује преко пантографа а ређе преко плаг-ин конектора. Погон возила се остварује преко два погонска мотора која су упарена и преко преносника обртни момент се преноси на диференцијал и погонске тачкове. Електронска управљачка јединица управља радом модула за дистрибуцију напајања и одређује потребну јачину струје која се из суперкондензатора одводи до инвертора који напајају погонске електромоторе електричном енергијом. Део струје из модула за дистрибуцију напајања усмерава се на рад помоћних уређаја као што је компресор, пумпа управљача и систем за грејање и хлађење возила. Из модула за дистрибуцију напаја се акумулатор који обезбеђује ниски напон 12÷24 V за осветљење, сигнализацију, информационе дисплејеве, инструмент таблу. Електронска управљачка јединица врши стални пријем сигнала из свих уређаја и система на возилу, врши њихову обраду и генерише контролне и управљачке сигнале. Контролу рада и управљања суперкондензатором врши посебна јединица UCMS (Ultracapacitor management system).

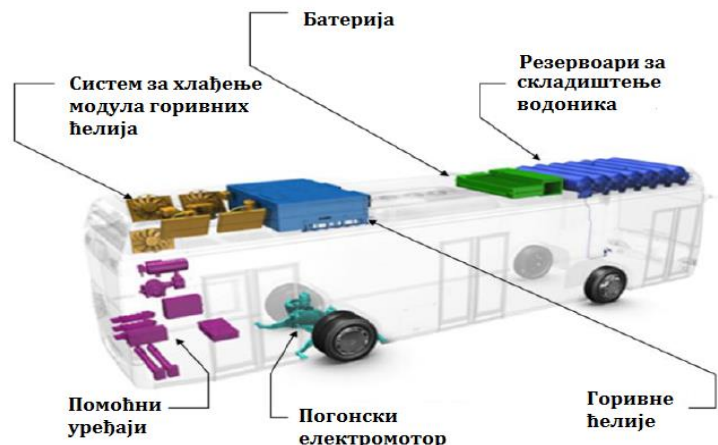
Предности коришћења суперкондензатора као система са складиштење електричне енергије је висока специфична снага коју може да испоручи погонском мотору, већа могућност прихватања енергије у фази рекуперације у односу на батерије, отпорност на дубинско пражњење и погодност рециклирања.

### 3.2.4 Аутобуси на електрични погон са горивним ћелијама

Аутобуси са погоном на горивне ћелије, FCEB (Fuel Cell Electric Bus) користе водоник ( $H_2$ ) и кисеоник ( $O_2$ ), из атмосфере за генерисање електричне струје која настаје кроз електро-хемијски процес и која се акумулира у батерије. Ова врста погона код возила представља могуће решење проблема енергије на глобалном плану јер користи водоник ( $H_2$ ) кога у природи има пре свега у води у неограниченим количинама. Главна предност коришћења овог типа погона јесте да у процесу добијања електричне струје нема емисије штетних материја, тако да овај концепт аутобуса има нулти утицај на животну средину.

Приказ основних компоненти аутобуса са погоном на горивне ћелије дат је на слици 3.4. Водоник се складишти у специјалне резервоаре под притиском од 350 bar, које се налазе у крову возила. Након редукације притиска на радни притисак од 8 bar, водоник се допрема до модула горивне ћелије. Два модула састоје се из мноштва горивних јединица (ћелија) које су међусобно спрегнуте.





Слика 3.4 Конфигурација електричног аутобуса са горивним ћелијама

Свака ћелија засебно представља један извор струје. У модул са горивим ћелијама узима се из ваздуха кисеоник ( $O_2$ ) и такође убацује у модул. Свака горивна ћелија има аноду и катоду, као и каталитичку мембрану која одваја молекуле водоника и кисеоника. Довођењем молекула водоника ( $H_2$ ) и кисеоника ( $O_2$ ) у ћелију, електрони између аноде и катоде успостављају струјно коло, док се слободни протони везују за молекуле кисеоника којима се придодаје део електрона са катоде, чинећи тако воду ( $H_2O$ ) и топлоту као нуспродукте реакције. Хлађење модула и обезбеђење радне температуре од  $70\div 80$  °C врши се преко система за хлађење. Произведена струја у ћелијама сакупља се у литијумским батеријама високог капацитета, после чега се врши инвертовање у наизменичну трофазну струју, напона од  $500\div 900$  V и фреквенције 400 Hz. Тако добијена струја покреће погонски електромотор чији се обртни моменат преноси на аутоматски мењач и даље на погонске точкове. Коришћење аутобуса са погоном на горивне ћелије данас нема карактер масовног коришћења из разлога изузетно сложене технологије производње, складиштења и дистрибуције водоника.

Производња овог типа аутобуса ограничена је на мале серије, што вишеструко повећава цену возила која износи око 650.000 € [76]. Потенцијал коришћења овог типа погона као потпуно еколошки прихватљивог је препознат, тако да се значајније коришћење ове технологије предвиђа тек после 2025. године [86].

### 3.2.5 Тролејбус са аутономним електричним погоном

Тролејбус је возило за превоз путника на електро-погон и сталним напајањем електричном енергијом из контактне мреже коју остварује преко два конектора (тролне мотке). Може се рећи да тролејбус представља претечу аутобусима на електрични погон. Контактна мрежа обезбеђује напајање тролејбуса једносмерном струјом (DC), напоном од 660 V. Исправљачке станице које су постављене дуж трасе претварају наизменичну струју (AC) из дистрибутивне мреже у једносмерну, неопходну за погон тролејбуса. Код тролејбуса, погонски електромотор може бити напајан једносмерном струјом (DC) из контактне мреже или код новијих тролејбуса погон је преко асинхроног електромотора за чије је напајање неопходно да се једносмерна струја из контактне мреже преко инвертора преведе у наизменичну струју (AC). Техничке карактеристике и конфигурација погона тролејбуса са асинхроним мотором је веома слична

аутобусу на електрични погон. Главни недостатак у експлоатацији тролејбуса јесте поузданост у снабдевању електричном енергијом, делимични или потпун отказ контактне мреже проузрокован кидањем дела мреже или отказом исправљачке станице. Да би се такве ситуације превазишле, савремени тролејбуси су опремљени сопственим системом складиштења електричне енергије, најчешће помоћу литијумских батерија или суперкондензатора. У случају делимичног отказа на контактної мрежи, тролејбус се снабдева струјом из батерије или суперкондензатора и прелази деоницу коришћењем електричне енергије из сопственог извора електричне енергије. У неким градовима који имају тролејбуски подсистем: Рим, Каљари (Италија), Будимпешта (Мађарска), контактна тролејбуска мрежа се измешта из централне градске зоне, тако да тролејбуси кад улазе у централну зону спуштају контактне мотке и раде у режиму погона из сопственог извора електричне енергије. Капацитет батерије је различит и може да буде од 5÷40 kWh зависно од дужине деонице где је контактна мрежа уклоњена или захтева оператера са минималном аутономијом која је потребна да се обезбеди тролејбусу.

### 3.3 Основне компоненте аутобуса на електрични погон

Основне компоненте и системи аутобуса на електрични погон, што га чини специфичним и различитим од аутобуса са других типовима погонских система, су [76]:

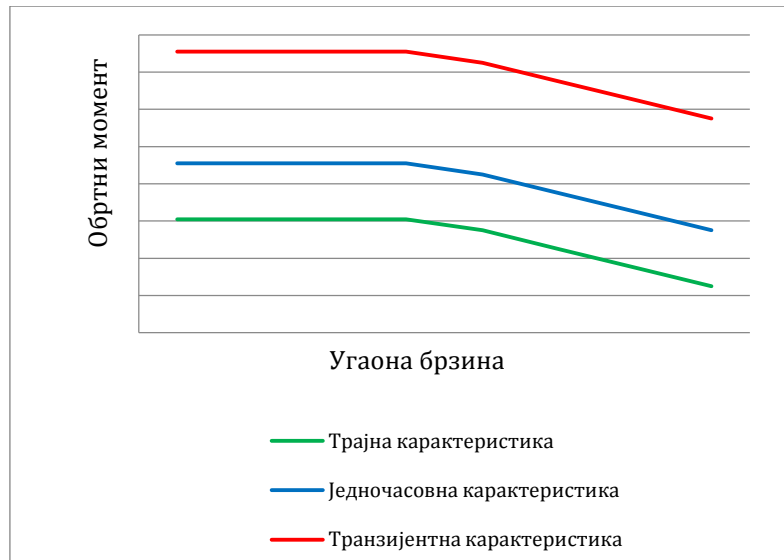
- погонски електромотор (генератор),
- систем за складиштење електричне енергије,
- систем регулације, контроле и управљања електричном енергијом,
- помоћни уређаји и системи који користе електричну енергију,
- систем за пуњење батерија или суперкондензатора.

#### 3.3.1 Погонски електромотор (генератор)

Електромотор као погонски систем нуди већу ефикасност и мањи ниво емитоване буке у поређењу са СУС моторима. Највећи обртни момент се постиже при малим бројевима обртаја што доводи до бољег убрзања возила. Значајна карактеристика је и генераторски режим рада погонског електромотора у фази успорења или кочења аутобуса, чиме се део кинетичке енергије аутобуса претвара у електричну енергију и тиме доприноси већој енергетској ефикасности возила. Специфични захтеви које електромотори треба да испуне за погон аутобуса су минимална тежина, висока ефикасност с обзиром на ограниченост капацитета батерије и потребна снага за све режиме кретања.

Погонски електромотори који се користе код аутобуса на електрични погон су најчешће индукциони асинхрони трофазни мотори, синхрони са сталном (перманентном) магнетном побудом или електромотори једносмерне струје, који су раније имали већу примену посебно код тролејбуса, али су због потребе честе замене четкица и нешто лошијих карактеристика при већим бројевима обртаја временом у потпуности замењени са већ поменутиим моторима.

Једна од најважнијих карактеристика погонског мотора је зависност обртног момента од угаоне брзине обртања која је представљена на слици 3.5 [87].



Слика 3.5 Приказ карактеристичних режима рада погонског електромотора

Трајна (номинална) карактеристика представља трајни дозвољени режим рада погонског електромотора. Њена карактеристика одговара реалним експлоатационим захтевима који се очекују за возило. Ако се изађе из овог режима рада долази до повећања температуре што представља опасност за мотор тј. изолацију и лежајеве. Једночасовна експлоатациона карактеристика представља дозвољени режим рада у трајању од једног часа а да не дође до загревања које може да оштети мотор. Транзијентна експлоатациона карактеристика има вредности максималних обртних момената који могу краткотрајно да се развију и она се јавља при старту мотора и мањим бројевима обртаја [87].

Код аутобуса са електричним погоном снага погонског електромотора за стандардни градски аутобус је најчешће 120÷180 kW а за зглобни 220÷240 kW [84,85]. Уграђени мотори морају да задовоље захтеве правилника UN ECE 85.00 (Internal Combustion Engines or Electric Drive Trains Intended for the Propulsion of Motor Vehicles of Categories M and N with Regard to the Measurement of the Netpower and the Maximum 30min Power of Electric Drive Trains).

Најчешће на возило се уграђује један погонски електромотор али постоје решења са два погонска електромотора која се упарују помоћу преносника снаге или се сваки електромотор уграђује директно у погонски точак.

Решења која су нашла примену код аутобуса на електрични погон су:

- конвенционални начин: електромотор је монтиран уместо СУС мотора, а пренос обртног момента на точкове остварују се помоћу кардана и диференцијалног преносника (слика 3.6),
- уградња у точкове погонске осовине: електромотори су монтирани на точкове са директним погоном или са редуктором (слика 3.7),
- два електромотора су упарена, збирни преносник снаге (редуктор) сумира обртни момент, одакле се помоћу кардана и диференцијалног преносника обртни моменат преноси на погонску осовину (слика 3.8).



Слика 3.6 Погонски електромотор уграђен на класични начин [88]

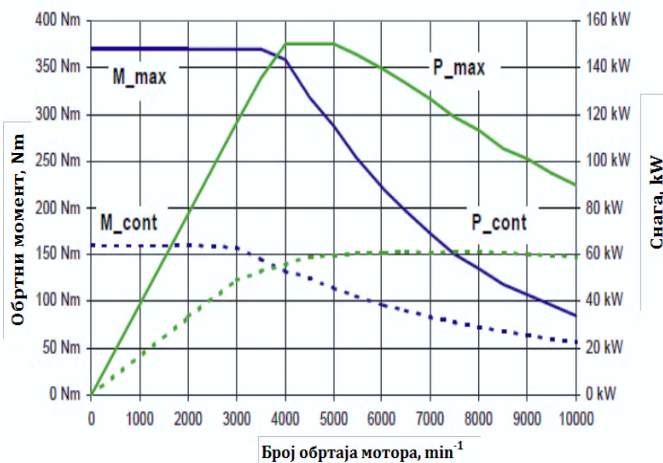


Слика 3.7 Погонски електромотори уграђени у тачкове погонске осовине [89]



Слика 3.8 Погонски електромотори упарени помоћу збирног преносника снаге [90]

Пример уградње два погонска електромотора Сименс (Siemens 1PV51354W24Z) која су међусобно упарена како је приказано на слици 3.8 се примењује на аутобусима на електрични погон Higer KLQ6195GEV3 чијих 5 возила се налазе у експлоатацији у ЈКП ГСП "Београд" од септембра 2016. године. Брзинска карактеристика погонског електромотора Siemens 1PV51354 W24Z и његове радне карактеристике представљене су на слици 3.9 и табели 3.2 [91].



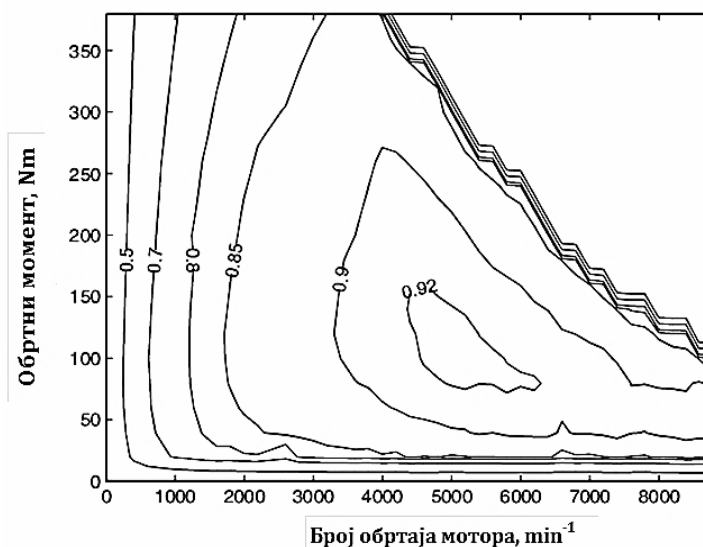
Слика 3.9 Брзинска карактеристика електромотора Siemens 1PV51354W24Z [91]

Табела 3.2  
Карактеристике електромотора  
Siemens 1PV51354W24Z

|                                   |
|-----------------------------------|
| тип: индукциони асинхрони         |
| хлађење: вода-гликол              |
| радни напон: 420÷585 V            |
| радна струја: 145÷300 A           |
| номинална снага: 61 kW            |
| номинални момент: 160 Nm          |
| максимална снага: 150 kW          |
| макс. обртни момент: 370 Nm       |
| макс. број обртаја: 10.000        |
| маса мотора: 90 kg                |
| радна температура: -30 °C ÷ 70 °C |
| димензије: 425x245x245 mm         |

Максимални обртни момент ( $M_{max}$ ) за овај тип мотора износи 370 Nm и остварује се при броју обрта од  $0 \div 3.550 \text{ min}^{-1}$ , док је максимална снага електромотора ( $P_{max}$ ) 150 kW у подручју броја обрта  $4.000 \div 5.000 \text{ min}^{-1}$ . Овај тип погонског мотора у режиму транзијентних карактеристика у трајању од 30 минута има снагу од 67 kW, у трајању од 5 минута има снагу од 90 kW и у трајању од 1 минута има снагу од 150 kW. Трајна (номинална) снага ( $P_{cont}$ ) је 61 kW, при чему номинални обртни момент ( $M_{cont}$ ) износи 160 Nm [92,93].

Једна од најважнијих карактеристика електромотора је његова енергетска ефикасност која представља коефицијент корисног дејства електромотора у зависности од обртног момента и броја обртаја електромотора. За погонски електромотор Siemens 1PV51354 и инвертор G650 D440/170/170 M7-1, шкољкасти дијаграм (мапа) ефикасности при различитим бројевима обртаја мотора и обртним моментима представљена је на слици 3.10 [94].



Слика 3.10 Мапа енергетске ефикасности електромотора Siemens 1PV51354 и инвертора G650 D440/170/170 M7-1 [94]

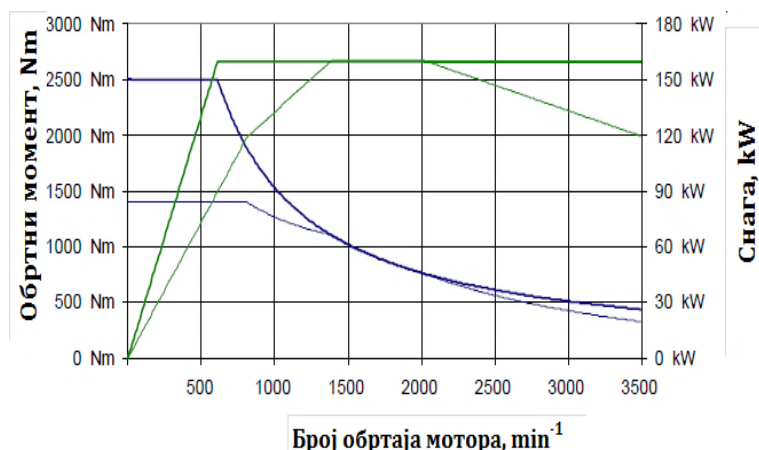
Синхрони мотори са сталним магнетима без четкица, РМВМ (Permanent Magnetic Brushless Motor) нашли су примену код погонских система у транспорту. Магнетско коло статора и намотаји статора електромотора са сталном магнетном побудом на ротору у потпуности су идентични као код асинхроних електричних машина.

Обртно магнетско поље индукује се у оба случаја преко трофазних система наизменичних струја статора, чија је брзина одређена кружном фреквенцијом статорских струја [95]. Код овог типа електромотора танки магнети супротног намагнетисања постављени су наизменично по површини ротора. Они су извор променљивог и радијалног магнетног поља које је статично у односу на ротор.

Код овог типа електромотора немамо клизање као код асинхроних мотора пошто је брзина обртања ротора једнака брзини обртања магнетног поља статора, чиме је постигнута синхронизација која омогућава да интеракција магнетних поља статора и ротора генеришу једносмерни електромагнетски обртни момент [95]. Главне предности мотора са сталним магнетом на ротору, када је њихова примена код аутобуса на електрични погон је:

- једноставна конструкција, мања тежина и запремина мотора,
- највећи степен корисности у односу на остале типове електромотора,
- високе вредности специфичне снаге ( $\text{Nm}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) и убрзања, што обезбеђује најбржи динамички одзив система на задату команду управљања.

Брзинска карактеристика погонског електромотора са сталним магнетом Siemens PEM-Motor 1DB2016-WS54 који се уграђује у аутобусе на електрични погон и његове карактеристике представљене су на слици 3.11 и табели 3.3 [91].



Табела 3.3  
Карактеристике електромотора  
Siemens PEM 1DB2016-WS54

|                                   |
|-----------------------------------|
| тип: синхрони са сталним магнетом |
| хлађење: вода-гликол              |
| радни напон: 650 V                |
| радна струја: 210÷350 A           |
| номинални момент: 1.500 Nm        |
| максимална снага: 160 kW          |
| максимални момент: 2.500 Nm       |
| максимални број обрта: 3.500      |
| маса мотора: 350 kg               |
| радна температура: -30 °C ÷ 70 °C |
| димензије: 510x510x500 mm         |

Слика 3.11 Брзинска карактеристика електромотора  
Siemens PEM 1DB2016-WS54

Код погонског електромотора са сталним магнетом Siemens PEM-Motor 1DB2016-WS54 при броју обртаја између 1.375 и 2.000 min<sup>-1</sup>, налази се подручје рада где се остварује максимална снага мотора.

### 3.3.2 Систем за складиштење електричне енергије код Е-буса

Системи за складиштење електричне енергије, EES (Electric Energy Storage) код аутобуса са електричним погоном најчешће су батерије или суперкондензатори и од суштинског су значаја да обезбеде потребну и довољну количину електричне енергије, неопходну за кретање и рад помоћних уређаја аутобуса. Захтев који је потребно испунити када су батерије или суперкондензатори у питању јесте обезбеђивање складиштења довољне количине електричне енергије и адекватне вршне снаге да би се постигле захтеване перформансе возила: убрзање, максимална брзина и аутономија кретања. Битно је да систем за складиштење може да омогући довољан број циклуса пуњења/пражњења који се неће одразити на исправност рада и планирани животни век. Важан захтев који системи за складиштење треба да испуне су и безбедности аспекти коришћења, посебно у ситуацијама судара возила, превртања, појаве пожара и слично.

Батерије или суперкондензатори су најскупље компоненте на аутобусу на електрични погон. Смањивање трошкова ових система и побољшање њихових радних карактеристика су од кључног значаја за још већу примену код аутобуса са електричним погоном. Рад сваке батерије заснива се на електро-хемијском процесу настанка једносмерне електричне струје између електрода и електролита која се јавља у ћелији батерије. Ћелија се састоји од аноде и катоде између којих се налази електролит. Када је примена батерија као система за складиштење код аутобуса и возила у питању данас се користе искључиво литијум-јонске батерије. Основни параметри којима се карактеришу батерије које се примењују на возилима су:

- **Напон батерије**

Батерија се састоји од великог броја ћелија које имају одговарајући номинални напон који зависи од технологије израде саме ћелије. Серијским повезивањем ћелија добија се потребни напон батерије.

- **Максимална јачина струје пуњења/пражњења**

Максимална јачина струје пуњења батерије је параметар који показује са којом је струјом могуће извршити пуњење батерије када се она повеже на пуњач. У фази пражњења батерије параметар је максимална јачина струје пражњења коју батерија може да преда потрошачу.

- **Капацитет батерије**

Капацитет батерије представља количину електричне енергије коју батерија може да преда потрошачу под стандардизованим условима у трајању од једног часа.

- **Време пуњења**

Представља потребно време да се батерија напуни од пројектованог минимума до максималне вредности капацитета батерије.

- **Специфична енергија**

Специфична енергија батерије је количина електричне енергије ускладиштена у батерији исказана по јединици масе батерије у  $\text{Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

- **Густина енергије**

Густина енергије батерије је количина електричне енергије ускладиштена у батерији исказана по кубном метру запремине батерије у  $\text{Wh}\cdot\text{m}^{-3}$ .

- **Специфична снага**

Специфична снага је однос максималне снаге коју батерија може да преда потрошачу и масе батерије исказана у  $\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

- **Самопражњење батерије**

Батерија се празни и кад се не користи. Ова појава представља самопражњење. Степен самопражњења најчешће зависи од старости батерије, периода кад се не користи и спољашње температуре.

- **Температурни опсег рада батерије**

Батерије имају оптимални температурни радни опсег који за литијумске батерије износи најчешће између  $-20^{\circ}\text{C}$  и  $60^{\circ}\text{C}$ . Изван овог температурног подручја долази до деградација перформанси, капацитета и сигурности рада батерије. Два главна фактора која изазивају ово прекорачење су унутрашње загревање батерије током рада и амбијентална температура кућишта батерије.

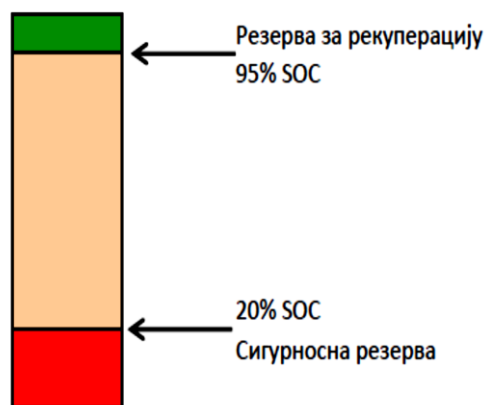
- **Степен напуњености батерије, SOC (State of charge)**

Представља количину ускладиштене електричне енергије у батерији у односу на максимални капацитет који батерија може да прими исказану у процентима (%).

- **Број циклуса пуњења/пражњења батерије**

Представља показатељ колико је пута могуће напунити батерију и испразнити је до прописаног минимума. Декларисани број циклуса пуњења од стране произвођача, интензитет коришћења, правилно коришћење и спољна температура утичу на трајање, односно животни век батерије. Када батерија не може да се пуни преко 70% SOC, сматра се да јој је истекао животни век. Као прихватљив начин коришћења батерије кад је пуњење/пражњење у питању, препоручује се правило „95%÷20% SOC” приказано на слици 3.12 [96]. Горња маргина одређује докле се врши пуњење батерије, а доња до које се вредности празни батерија.





Слика 3.12 Границе пуњења и пражњења батерије код електричног аутобуса

Суперкондензатор чини велики број кондензатора међусобно спрегнутих, чиме се постижу захтеване карактеристике. Принцип рада кондензатора је електростатички, где се наелектрисањем плоча кондензатора, између којих се налази изолатор ствара електрично поље.

Електрична енергија ускладиштена у кондензатор одређена је изразом:

$$E_{con} = \frac{1}{2} C_{con} \cdot U_c^2, \text{ J}, \quad (2.1)$$

$$E_{con} = \frac{1}{7.2 \cdot 10^6} C_{con} \cdot U_c^2, \text{ kWh}, \quad (2.2)$$

где је:

$E_{con}$  – ускладиштена електрична енергија,

$C_{con}$  – капацитет кондензатора, F,

$U_c$  – напон кондензатора, V.

Кондензатори се повезују серијски, паралелно или комбиновано чинећи тако кондензаторску батерију. Ако се ради о великом броју кондензатора онда је реч о суперкондензатору. У табели 3.4 дат је упоредни приказ карактеристика примењених технологија (суперкондензатора и батерија) за складиштење електричне енергије код аутобуса на електрични погон [97].

Табела 3.4 Карактеристике суперкондензатора и литијумских батерија

| Карактеристика                           | Суперкондензатори                           | Батерије   |
|--|---|--|
| Принцип рада                             | Електростатички                             | Електрохемијски                                      |
| Напон ћелије, V                          | 2,3÷2,7                                     | 2,2÷3,8  |
| Специфична енергија, Wh·kg <sup>-1</sup> | 5   | 10   |
| Специфична снага, W·kg <sup>-1</sup>     | 10.000                                      | 3.500  |
| Однос снаге и капацитета                 | Висока снага, "C">1000, мањи капацитет, kWh | Већи расположиви капацитет, kWh, мања снага, "C"<100 |
| Ефикасност                               | 92÷98 %                                     | 85÷95 %  |
| Температурни опсег рада                  | -40 °C до +65 °C                            | -20 °C до +40 °C                                     |
| Процес пуњења                            | Једноставнији процес пуњења                 | Сложенији процес пуњења                              |
| Број циклуса пуњења                      | 1.000.000                                   | 100.000  |
| Брза пражњења и пуњења                   | Флексибилност на брза пражњења и пуњења     | Осетљивост на брза пражњења и пуњења                 |
| Животни век                              | 10÷15 година                                | 6÷8 година   |
| Рециклажа                                | Погодни за рециклажу                        | Већи захтеви за рециклажу                            |



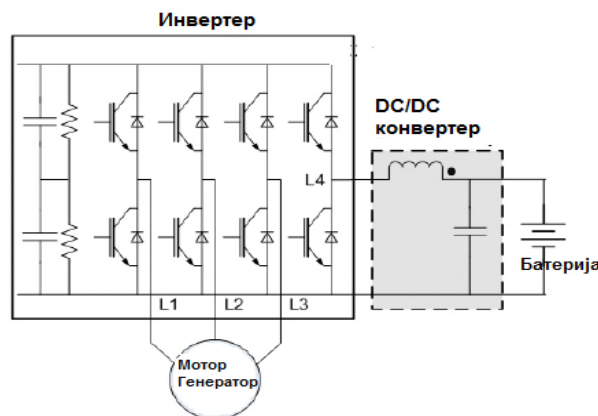
Суперкондензатори који се користе код аутобуса на електрични погон карактерише висока специфична снага, висока ефикасност рада, брзо време допуњавања, дужи радни век, погодност рециклирања. Недостатак је мања специфична енергија и капацитет који имају у поређењу са батеријама. У почетној фази пуњења код батерија постоји највећа струја пуњења, чија вредност опада са степеном напуњености батерије. У фази пражњења кад је батерија напуњена до свог максимума, излазна струја је максимална и опада са пражњењем батерије. Код суперкондензатора, карактеристика пуњења и пражњења је боља у поређењу са батеријама. Код суперкондензатора је боља искоришћеност расположивог капацитета складиштења енергије. Суперкондензаторе је могуће испразнити до самог минимума (2-3% од максималног степена напуњености), док је код батерија то најчешће до 20% од максималног степена напуњености.

### 3.4 Систем регулације, контроле и управљања електричном енергијом код аутобуса на електрични погон

Овај интегрисани систем на аутобусу на електрични погон првенствено контролише проток електричне енергије од система пуњења, складиштења, инвертовања до самог погонског мотора. Овај систем такође контролише и регулише брзину обртања мотора и обртни момент као и дистрибуцију електричне енергије ка другим, помоћним системима возила као што су грејање, хлађење, вентилација и осветљење. Најважније компоненте овог система су:

- **Инвертор и конвертер**

Инвертор у систему електричног погона претвара једносмерну струју (DC) из батерија у наизменичну струју (AC) којом се покреће асинхрони погонски електромотор. Инвертор такође делује као моторни контролер преко кога се регулише интензитет струје погона која зависи од захтеваног режима рада и као заштита батерија од оштећења. Мотори у генераторском режиму рада, формирају трофазни напон на својим прикључцима. Диоде у транзисторима вучног инвертора наизменични напон исправљају и прослеђују као једносмерни напон. Једносмерни напон се не може директно довести до система за складиштење електричне енергије, већ се преко посебног чопера (DC/DC конвертора) преводи у вредност која одговара „пуњењу“ батерије или суперкондензатора како је приказано на слици 3.13 [91].

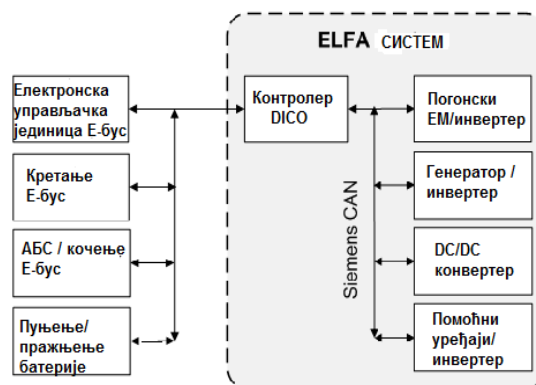


Слика 3.13 Блок шема ELFA инвертора

Рад овог система је одређен стањем напуњености батерије/суперкондензатора, температуром ћелија, вредношћу максималног напона по ћелији, максималном дозвољеном струјом пуњења. Активирањем кочног чопера, вишак енергије електричног кочења претвара се у топлоту у кочном отпорнику. Конвертер регулише величину једносмерног напона, односно његово смањење или повећавање зависно од потреба рада одређеног система на возилу.

### • Контролер

Контролер код свих аутобуса на електрични погон представља управљачко-контролну јединицу погонског система која сакупља и обрађује податке из свих система на возилу као што је кретање, регенеративно кочење, пуњење. На основу ових информација доноси одлуку о даљем деловању и успостављању везе са одговарајућим системом за извршење захтеване радње. Архитектура управљања контролера Siemens ELFA-DICO [91] који је примењен код аутобуса Niger KLQ6125GEV3 приказана је на слици 3.14.



Слика 3.14 Siemens ELFA-DICO контролер

Комуникација DICO контролера са разним електронским јединицама возила врши се преко CAN мреже. DICO ради не само као контролер ELFA погонског система (електромотор/инвертор, генератор/инвертор, DC/DC конвертор, помоћни уређаји/инвертор) већ и као надзорни контролер који контролише рад система, надзире статус система и управља комуникацијама. Може комуницирати са електронском управљачком јединицом возила, јединицом кочног системом, јединицом за кретање и јединицом за управљање енергијом из система за складиштење електричне енергије.

Управљање радом батерија/суперкондензатора врши се преко контролне јединице, BMS (Battery management system).

BMS контролна јединица врши мерења и прикупљање података о напону и радној температури сваке ћелије батерије, мерење струје пуњења/пражњења батерије, мерење унутрашње импедансе ћелија. BMS врши њихову обраду преко специјализованог софтвера и на основу тога и раније запамћених мерења (и параметрисаних података) врши одређивање статуса сваке ћелије батерије. На основу тога BMS контролна јединица омогућава следеће функције:

- контролише исправност сваке ћелије,
- при рекуперацији, у циљу заштите батерије, може дати команду инвертору, да енергију рекуперације од регенеративног кочења преусмери у кочни отпорник,

- утиче на рад пуњача батерије и спречава да дође до препуњавање и прегревање ћелија,
- примењује одговарајућу технику „балансирања“ ћелија, у складу са својом конструкцијом,
- у зависности од конструкције, локализује неисправне ћелије и изолује их из батерије,
- открива нерегуларности у раду и отклања их,
- комуницира са системом за хлађење батерија (ваздушним или помоћу расхладног флуида),
- одређује стање напуњености батерије, SOC (State of charge battery),
- одређује стање испражњености батерије, DOD (Depth-of-Discharge),
- одређује садашње стање капацитета батерије, у односу на стање, када је била нова, SOH (State-of-Health),
- прогнозира колики је још преостали животни век батерије, SOL (State-of-Life),
- припрема и шаље предвиђене податке за приказ на дисплеју возала,
- формира и чува историју „грешака“ и других података потребних сервисном особљу.

### 3.5 Помоћни уређаји и системи који користе електричну енергију

Помоћни уређаји код аутобуса на електрични погон који се напајају електричном енергијом из батерије или суперкондензатора, омогућавају исправан рад возила посматрано са становишта техничке исправности, безбедности саобраћаја и задовољавања захтева комфора за возача и путнике у возилу. Најважнији помоћни уређаји на Е-бусу су:

- компресор за производњу компримованог ваздуха за кочни систем и ослањање Е-буса,
- пумпа серво система управљача,
- систем за грејање и хлађење путничког простора и радног места возача,
- сигнализација возила, унутрашње и спољашње осветљење, дисплеји.

### 3.6 Систем за пуњење електричном енергијом

Пуњење електричном енергијом батерија или суперкондензатора, представља важан аспект експлоатације и организације рада аутобуса са електричним погоном. У пракси се примењују три основне стратегије:

- Споро пуњење помоћу "плаг-ин" (plug-in ) конектора;
- Брзо пуњење помоћу пантографа;
- Бесконтактно допуњавање.

Избор система за пуњење аутобуса са електричним погоном одређен је типом и величином батерије или суперкондензатора, захтевима у погледу трајања пуњења, расположивим енергетским могућностима електричне мреже и простором предвиђеним за пуњење. Најчешће примењиви начина пуњења аутобуса на електрични погон представљени су у табели 3.5.

Табела 3.5 Начини пуњења батерија и суперкондензатора код Е-буса

| Стратегија пуњења         | Пуњење у гаражи | Пуњење на терминусу |     | Пуњење на линији |                   |
|---------------------------|-----------------|---------------------|-----|------------------|-------------------|
|                           |                 | једном              | оба | у станици        | динамичко (Wi-Fi) |
| Споро пуњење              | да              | -                   | -   | -                | -                 |
| Брзо пуњење               | да              | да                  | да  | да               | -                 |
| Комбиновано, споро и брзо | да              | да                  | да  |                  |                   |
| Бесконтактно              | да              | да                  | да  | да               | да                |

У пракси тренутно су највише заступљене стратегије спорог и брзог пуњења у гаражи или на терминусима, док се бесконтактно пуњење ређе сусреће у пракси.

Споро пуњење (Slow charging) примењује се искључиво код Е-буса са батеријама. Код овог концепта пуњење аутобуса врши се у периоду када возило није на раду што је најчешће током ноћног периода, због чега се често назива и ноћним пуњењем (Night charging). Аутобуси на електрични погон стандардне дужине од 12 m, који се пуне на овај начин имају батерије са великим капацитетом од 160÷425 kWh, што им омогућава значајну дневну аутономију кретања која може бити и преко 250 km.

Снага пуњача за споро пуњење који се поставља у гаражи је најчешће од 60÷150 kW [98], тако да процес пуњења траје између 2,5 и 6 часова зависно од степена испражњености батерије, капацитета и снаге пуњења. У табели 3.6 представљени су очекивани електрични губици који се јавља у процесу спорог пуњења Е-буса посматрано од извора пуњења до погонског мотора [99].

Табела 3.6 Губици по компонентама система за споро пуњење

| Компонента система   | коефицијент корисног дејства ( $\eta$ ) |
|--|---|
| Пуњач  | 0,95                                    |
| Пуњење батерије (унутрашњи отпор батерије)                       | 0,95                                    |
| Пажњење батерије (унутрашњи отпор батерије и губици у кабловима) | 0,93                                    |
| Инвертор   | 0,97                                    |
| Погонски електромотор  | 0,95                                    |
| Укупно за цео систем   | 0,77                                    |

Лоша страна овог концепта је висока зависност дневне аутономије кретања Е-буса од експлоатационих услова и рада помоћних система. У периоду када се користи систем за хлађење или систем за грејање путничког простора возила као великих потрошача електричне енергије, аутономија коју Е-бус може да савлада са једним пуњењем батерије може да буде 30÷50% мања, што представља проблем ради остварења планиране аутономије Е-буса.

Један од проблема у примени овог концепта пуњења је што ако се истовремено пуне више аутобуса током ноћи или дана они заузимају велики радни простор у депоу и ангажују истовремену велику снагу из јавне дистрибутивне електро мреже. За рад већег број аутобуса на електрични погон са овим концептом потреба су значајна улагања у адаптацију или изградњу простора за пуњење и пуњача [99].

Брзо пуњење аутобуса на електрични погон (Fast charging) може да се врши на станицама дуж трасе линије или што је чешћи случај на почетно/завршним

станицама (терминусима) на линији где се Е-бус налази на раду, као и у депоу где се возило паркира и припрема за наредни дан. Аутобуси на електрични погон са овим концептом пуњења имају литијум-титан батерије (LTO) чији је капацитет најчешће од 60÷90 kWh [100] или суперкондензатор капацитета најчешће од 20÷40 kWh [80]. У поређењу са аутобусима на електрични погон са спорим пуњењем овај тип Е-буса има ограничену аутономију, тако да се користе на унапред дефинисаним линијама, где се постављају пуњачи најчешће на терминусима, тако да се допуњавање возила врши за време планираног задржавања на почетној станици. Пуњење се врши преко пантографа који је уграђен у кров аутобуса и који се активира на месту предвиђеном за пуњење. Просечно време пуњења је 5÷15 минута и обавља се после сваког оствареног полуобрта (један смер), обрта (оба смера) или више обрта, зависно од капацитета батерија или суперкондензатора, експлоатационих услова и снаге система за брзо пуњење.

Снага система за брзо пуњење који се поставља на терминусу је најчешће од 150÷400 kW. Брзо пуњење аутобуса на електрични погон често се назива и пуњење према потреби (Opportunity charging), с обзиром да зависно од капацитета батерије и експлоатационих услова, пражњење батерије може бити различитог интензитета, па је на тај начин одређен и оптимални моменат пуњења батерије који је најчешће одређен вредношћу SOC између 30÷40%. Допуњавање овог типа Е-буса у гаражи може да се обавља преко пантографа (брзо пуњење) или је возило опремљено са "plug-in" конектором за споро пуњење. На тај начин постоји комбиновано пуњење возила.

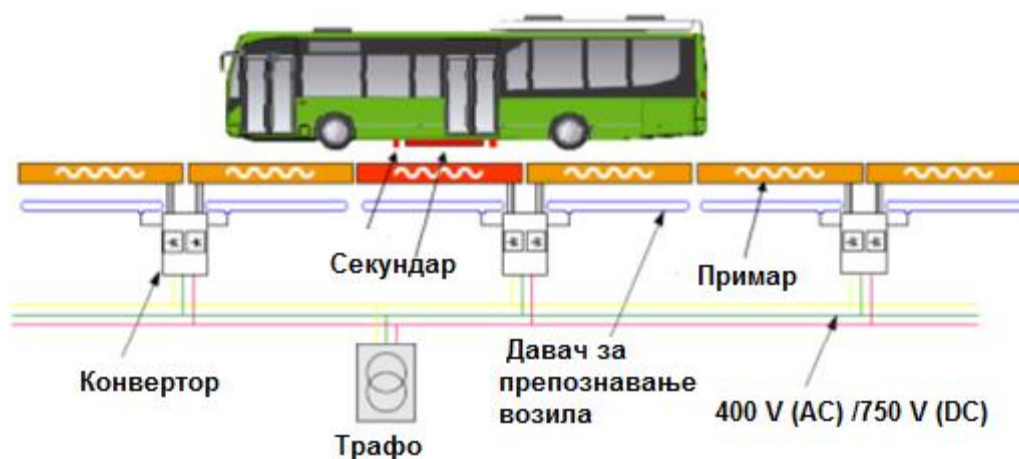
У табели 3.7 представљени су очекивани електрични губици који се јавља у процесу брзог пуњења преко пантографа Е-буса, који користи суперкондензатор као систем за складиштење електричне енергије, посматрано од извора пуњења до погонског мотора [85,92].

Табела 3.7 Губици по компонентама система код пантографског пуњења

| Компонента система                                     | Максимални коефицијент корисног дејства ( $\eta$ ) |
|--|--|
| Пуњач + Пантограф                                      | ~ 0,95   |
| Унутрашњи отпор суперкондензатора и губици у кабловима | 0,97÷0,98  |
| Инвертор   | 0,97   |
| Погонски електромотор                                  | 0,95   |
| Укупно за цео систем                                   | 0,85   |

У поређењу са системом спорог пуњења код брзог пуњења помоћу пантографа присутан је мањи губитак електричне енергије посматрано од извора пуњења до погонског електромотора.

Пуњење електричних аутобуса може се обавити и бесконтактним начином, који се заснива на принципу преноса електричне енергије помоћу магнетне индукције. Примарни намотаји налазе се уграђени у подлози, најчешће на терминусу. Секундарни намотаји налазе се уграђени на Е-бус (слика 3.15).



Слика 3.15 Бесконтактни начин пуњења, систем "PRIMOVE" произвођача *Bombardier* [68]

Произвођач Бомбардиер (*Bombardier*) од 2013. године користи овај систем пуњења Прајмув (*Primove*) који је инсталиран у Монреалу, Берлину, Манхајму и Брижу [101]. Наиласком Е-буса на подлогу где је постављен примар, сензори препознају Е-бус, после чега је омогућено укључење система и бесконтактни пренос електричне енергије, односно пуњење батерије на возилу. Овај процес траје 5÷8 минута зависно од капацитета батерије и снаге пуњача која је од 400÷600 kW. Код овог система пуњења постоји већи губитак електричне енергију посматрано од извора пуњења до погонског електромотора, с обзиром на већи број компоненти који чине систем пуњења.

Даљи развој технологије брзог пуњења код аутобуса на електрични погон ићи ће у правцу развоја технологије пуњења возила у покрету, које ће омогућавати да Е-бус у зони одређених станица преко бежичне мреже (*Wireless-connection*) врши пуњење батерије или суперкондензатора.

## 4. УВОЂЕЊЕ АУТОБУСА НА ЕЛЕКТРИЧНИ ПОГОН У СВЕТУ

Примена потпуно електричног погона у аутобусима за јавни градски транспорт треба да додатно смањи ниво емисије штетних гасова који потичу из саобраћаја у градовима, повећа енергетску ефикасност и допринесе остваривању стратегије употребе возила са нултом емисијом у градовима што је планирано после 2050. године. Убрзани развој технологије батерија и система за пуњење допринели су да концепт електричног аутобуса од 2008. године буде све више присутан у многим градовима пре свега Кине, Европе и Северне Америке. Нешто раније започето увођење аутобуса са хибридниим погоном, представљало је прву фазу примене електричног погона док аутобуси са потпуно електричним погоном представљају следећи корак.

### 4.1 Увођење аутобуса на електрични погон у Кини и Азији

Кина је светски лидер у производњи аутобуса на електрични погон и њиховој имплементацији у многе системе јавног градског транспорта. Демонстрација рада потпуно електричног аутобуса у Пекингу 2008. године током Олимпијских игара, отворила је ново поглавље у развоју овог концепта погона. Већ 2010. године на тржишту Кине постоје аутобуси на потпуно електрични погон стандардне дужине 12 метара који су могли да остваре аутономију кретања од 250÷300 km, са једним пуњењем [103]. Према извештају из 2017. године од стране Међународне агенције за енергију, IEA (Report-Global EV, Outlook 2017), у свету је било у употреби око 345.000 аутобуса на електрични погон, од чега је у Кини у употреби 343.500 возила или 99,5%. Од тог броја процењује се да је око 300.000 аутобуса на потпуно електрични погон који користе батерије као систем за складиштење електричне енергије [103].

Увођење аутобуса на електрични погон у градове Кине представља државни пројекат, као једна од мера смањења аерозагађења посебно у великим градовима: Пекинг, Шангај, Шенжен, итд. У циљу подстицаја за набавку електричних аутобуса, Министарство транспорта Кине обезбедило је произвођачима возила субвенцију у износу од 81.600 USD по једном електричном аутобусу [104]. Ова подстицајна мера утицала је да је у 2016. години у Кини продато 160.000 аутобуса на електрични погон. Након ове рекордне продаје аутобуса на електрични погон Влада Кине смањила је субвенцију за 20%, али се и даље очекује раст продаје који у 2020. години треба да достигне број од 200.000 електричних аутобуса [102]. Град Шенжен је први град у свету који има у раду 16.500 аутобуса на електрични погон, чиме је аутобуски подсистем јавног градског транспорта 100% "електрификован". План увођења аутобуса на електрични погон у Пекингу је да се у 2020. години достигне 10.000 Е-бусева. Град Гуанџоу (Guangzhou) у 2018. години реализовао је набавку од 4.810 аутобуса на електрични погон [105].

Обим производње "Нових енергетских аутобуса" (New Energy Buses), што је званични назив у Кини за аутобусе на електрични погон, који обухватају батеријске, хибридне plug-in и горивне ћелије, достигао је рекордни број од 135.305 возила у 2016. години [102]. Највећи произвођачи су компаније: Јутонг (Yutong), БИД (BYD), Зонтонг (Zhontong), Јинлонг (Yinlong), чије процентуално учешће у производњи за 2016. годину износи респективно 19%, 13%, 10%, 7% [105]. Највећи светски произвођач аутобуса на електрични погон компанија



Yutong у 2018. години остварила је продају 24.748 "Нових енергетских аутобуса", од чега је 22.744 батеријска аутобуса на потпуно електрични погон [98].

Индија представља велико тржиште аутобуса за јавни градски превоз чија годишња продаја у 2017. години износи око 70.000 аутобуса свих типова. У 2018. години 932 аутобуса на електрични погон је продато на овом тржишту и представља велики потенцијал на тржишту Азије [105].

Од других азијских држава и градова веће коришћење аутобуса на електрични погон постоји у Сингапуру, где је после периода тестирања које је спроведено од новембра 2016 до маја 2017. године са Е-бусом произвођача BYD на три градске линије, у 2019. години покренута набавка 60 аутобуса на потпуно електрични погон произвођача BYD и 50 хибридних plug-in аутобуса произвођача Волво (Volvo) [106].

Северна Кореја је увођење аутобуса на електрични погон отпочела од 2013. године када је 14 возила било у периоду тестирања на три градске линије у граду Намсан. Од тог периода бележи се пораст броја аутобуса на електрични погон и њихова експлоатација у градовима: Пусан, Поханг, Џејџу (Jeju), Гуми (Gumi). У 2017. години достигнут је број од 119 аутобуса на електрични погон [107].

#### **4.2 Увођење аутобуса на електрични погон у Европи**

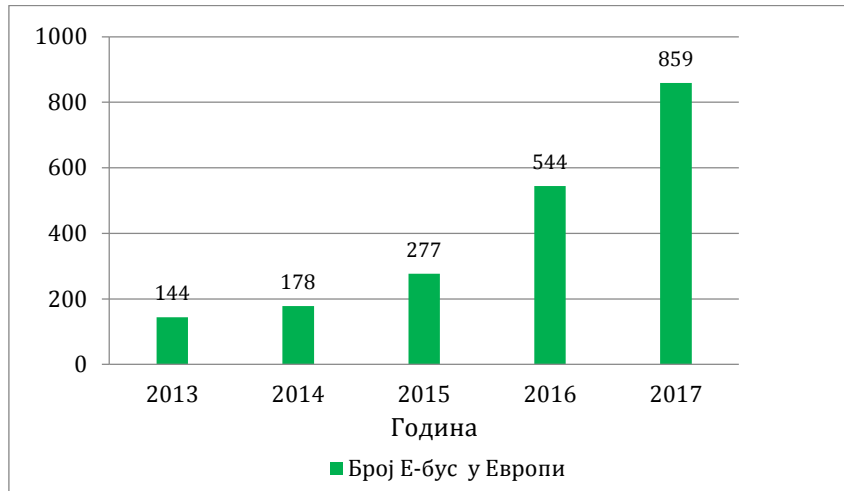
Почетак увођења аутобуса на потпуно електрични погон у Европи бележи се од 2013. године, када су у неким градовима: Ротердам, Милано, Барселона, Бремен, Лондон, Копенхаген, Хамбург, итд, рађена пробна тестирања најчешће са једним или два Е-буса [83]. Опредељење ка увођењу аутобуса на електрични погон у многим европским градовима могуће је видети из анкете која је спроведена 2013. године у 64 града из 24 државе Европе, која је рађена у оквиру европског пројекта 3IBS (Intelligent, innovative, integrated bus system). Према резултату анкете и прогнозираном сценарију за 2030. годину, заступљеност аутобуса на електрични погон које је у тренутку спровођења истраживања износило око 1,2%, имаће тенденцију повећања на чак 41,5% [11].

Важан корак у већем коришћењу и афирмацији аутобуса на електрични погон представљао је пројекат ЗЕУС, ZeEUS (Zero emission urban System), који је покренут од Европске уније у периоду 2013-2017. година. Циљ пројекта било је тестирање и сагледавање експлоатационих, еколошких, економских и друштвених аспеката коришћења електричног концепта градских аутобуса, као важног фактора унапређења урбане мобилности и имплементације аутобуса са електричним погоном у системе јавног градског транспорта са возилима различитих произвођача и типова (стандардни, зглоб, спратни), различитих технологија батерија и система пуњења у различитим климатским условима. Учешће у пројекту је узело 40 партнера из различитих области.

Поред пројекта ZeEUS као најзначајнијег, многи градови у Европи покренули су сопствене пројекте увођења аутобуса на електрични погон: Амстердам, Гетеборг, Берлин, Беч, Софија, Београд, што је резултирало да је према званичном извештају пројекта ZeEUS који је објављен у октобру 2017. године у Европи у 90 градова било више од 800 аутобуса на електрични погон који су обухватили потпуно електричне, хибридне (plug in) и тролејбусе са батеријама [102]. Пораст броја



аутобуса на електрични погон у Европи по годинама за период 2013-2017. година приказан је на слици 4.1 [108].



Слика 4.1 Тренд раста броја аутобуса на електрични погон у Европи

Од укупног броја аутобуса на електрични погон 67% су аутобуси са потпуно електричним погоном који користе батерије за складиштење електричне енергије, 2% су потпуно електрични аутобуси који користе суперкондензаторе, 12% су хибридни са plug-in пуњењем и 19% тролејбуси који имају батерије за аутономно кретање [102, 108].

У наведеном периоду највећи број градова имао је до 10 електричних аутобуса у раду а само 8 градова имало је преко 10 возила у раду. Просечни дневни пређени број километара по возилу износио је до 200 km за 75% возила, између 200 и 300 km за 23% возила, док је свега 2% електричних возила остваривало преко 300 km дневно. Избор стратегије пуњења био је 58% ноћно пуњење у депоу, 22% пуњење помоћу пантографа (брзо пуњење), 15% plug-in и 5% индукционо (бесконтактно-брзо). Према статистици наведени аутобуси остварили су око 20 милиона пређених километара у потпуно електричном режиму [102,108].

Посматрано по градовима највећи број аутобуса на потпуно електрични погон на крају 2017. године имали су: Лондон 141, Манчестер 105, Шипол 100, Париз 80, Нотингем 58, Ротердам 58, Осло 57, Ајдховен 43, Милано 34, Берлин 30, Гетеборг 30, Умеа 25 [108].

Тренд пораста броја аутобуса са потпуно електричним погоном настављен је и 2018. године, када је у Европској унији регистровано нових 562 батеријских аутобуса, што је представљало око 5% годишње продаје градских аутобуса у Европској унији [109].

Неки градови у 2019. години покренули су тендере за набавке нових Е-буса од којих су најзначајније: Рим 200, Милано 150, Гронингем 160, Висбаден 56, Венција 30, Берлин 30, Хамбург 30 [105]. Од децембра 2019. године град Нант увео је у редовну експлоатацију 22 аутобуса на потпуно електрични погон произвођача Хес (Hess) дужине 24,5 m.

На UITP светском самиту и изложби који је одржан 9-12. јуна 2019. године у Стокхолму на сесији посвећеној аутобусима на електрични погон изнет је податак да је тренутно у Европи у раду око 2.500 аутобуса на електрични погон свих

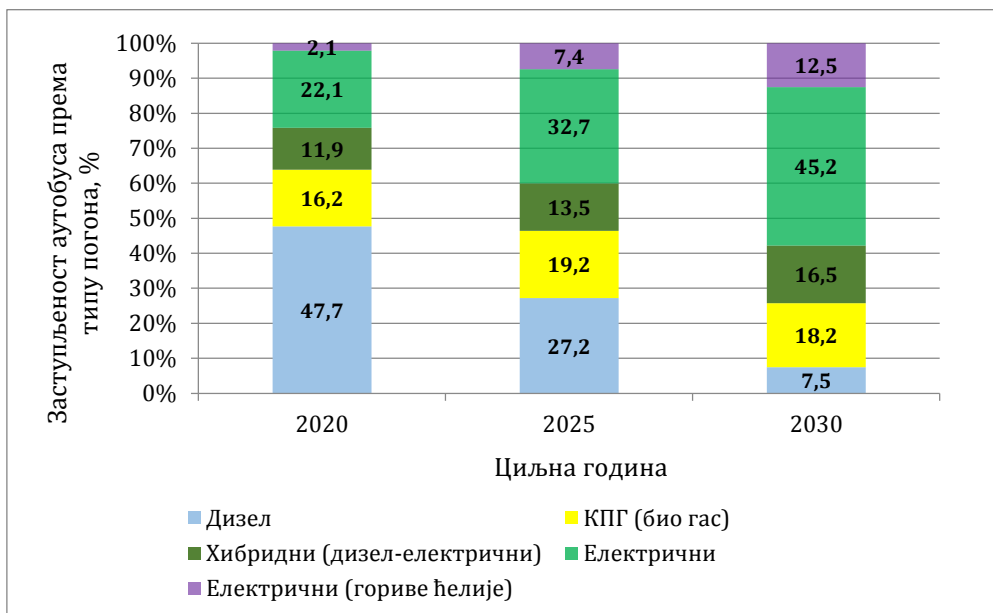
типова и конфигурација рачунајући и хибридне plug-in. Према расположивим подацима у Европи је само у 2019. години (закључно са 30.9.2019. године) било регистровано 1.123 нових аутобуса на електрични погон [53].

Град Москва је у септембру 2018. године започео регуларну експлоатацију 15 аутобуса на потпуно електрични погон. У 2019. години реализована је набавка још 285 аутобуса на електрични погон произвођача КАМАЗ и ГАЗ, чиме је Москва постала један од водећих градова изван Кине по броју аутобуса на електрични погон. Даљи тренд увођења аутобуса на електрични погон у Москви настављен је и 2020. године расписивањем тендера за куповину још 300 аутобуса на електрични погон [110].

Норвешки град Берген од августа 2020. године увео је 102 стандардна аутобуса на електрични погон произвођача Yutong у редовну експлоатацију [111]. Више од 150 аутобуса на потпуно електрични погон од јула 2020. године је у редовној експлоатацији у Паризу.

Град Београд, главни град Републике Србије успоставио је 01.09.2016. године прву градску линију ЕКО 1 на којој ради искључиво 5 аутобуса на електрични погон. Током обележавања Европске недеље мобилности (European Mobility Week 2020) која је одржана у септембру 2020. године, Град Београд је најавио покретање јавне набавке за куповину 10 аутобуса на електрични погон, до краја 2020. године.

Даља заступљеност аутобуса на електрични погон у укупном броју аутобуса за јавни градски превоз у Европској унији према процени UITP из 2017. године, приказано је на слици 4.2 [108].



Слика 4.2 Прогноза заступљености аутобуса за јавни градски транспорт у ЕУ према типу погона

Прогноза је да ће у 2025. године учешће аутобуса на потпуно електрични погон износити 40,1% а 2030. године достићи 57,7%.

### 4.3 Увођење аутобуса на електрични погон у Северној Америци

У Сједињеним Америчким Државама увођење првих аутобуса на потпуно електрични погон почиње од 2013. године када су 24 батеријска аутобуса први пут пуштена у рад. Ови аутобуси коришћени су у међуградском транспорту и представљали су занемарив број од укупног броја аутобуса који је радио у међуградском транспорту и који се процењивао на 35.000 [112]. Наредне 2014. године амерички произвођач аутобуса Протера (Proterra) испоручио је 56 батеријских аутобуса у 9 транспортних компанија широм САД.

У истој години и кинески произвођач аутобуса на електрични погон BYD испоручио је првих 13 батеријских аутобуса Универзитету Станфорд (Stanford University) који је радио пробна тестирања у градовима Америке [113]. Значај увођења аутобуса на електрични погон као возила са нултом емисијом директно је стимулисан од Савезне администрације за транспорт, FTA (Federal Transit Administration) у периоду 2013-2018. година са 271 милион америчких долара (USD). Према подацима из августа 2018. године, које је објавио Калстарт институт из Пасадене (Calstart Institute Pasadena) укупни број аутобуса на потпуно електрични погон износио је 1.650, од чега су 67 аутобуса са погоном на горивне ћелије, а 1.583 батеријски електрични аутобуси. Највећи број од 877 потпуно електричних аутобуса регистрован је у Калифорнији, што чини 53% од укупног броја. У савезној држави Вашингтон у раду је 154 Е-буса, на Флориди 70, Индијана 66, Илинојс 59 [114].

У Канади први тест са аутобусом на потпуно електрични погон спроведен је током 2013-2014. године од стране Транспортне компаније Лавал, STL (Société de Transport de Laval). Овај пројекат подржан је од провинције Квебек (Quebec) као једна од стратегија промовисања "зелене енергије" у транспорту, с обзиром да Квебек располаже великим бројем хидроелектрана. У 2016. години Транспортна компанија Монреал, STM (Société de Transport de Montréal) пустила је у рад 3 аутобуса на потпуно електрични погон. Идеја је да се у трогодишњем испитивања сагледају оптималне могућности избора система за пуњење возила, с обзиром на изузетно захтевну експлоатацију у зимском периоду [115]. Треба истаћи да компанија STM од 2016. године у раду има и 51 аутобус на хибридни погон, што чини 12% од инвентарског броја аутобуса [116]. Компанија Метро Ванкувер (Metro Vancouver) од 2017. године има 4 аутобуса на електрични погон. Заједно са градовима Онтарио и Брамптон учествује у пројекту истраживања јавног транспорта у Канади (Canadian Urban Transit Research) са циљем тестирања аутобуса на електрични погон у екстремним зимским условима рада који су присутни у Канади [117]. Град Торонто је 2018. године спровео пробно тестирање са 10 аутобуса на електрични погон различитих произвођача: BYD, Proterra, Њу Флајер (New Flyer), а на основу резултата тестирања биће набављено 20 аутобуса на електрични погон.

### 4.4 Увођење аутобуса на електрични погон у Јужној Америци

Прво пробно тестирање са два аутобуса на потпуно електрични погон, кинеског произвођача BYD спроведено је у компанији Транс Сантјаго - Сантјаго де Чиле (Transantiago-Santiago de Chile) у новембру 2017. године. На основу позитивних резултата тестирања у новембру 2018. године уговорена је набавка 100

стандардних електричних аутобуса BYD. На предлог Владе Чилеа у циљу увођења нових еколошких аутобуса са нултом емисијом и замене аутобуса са погоном на дизел гориво у 2019. години је набављено још 100 аутобуса на електрични погон, које је испоручио кинески произвођач Yutong за потребе компанија СТП Сантјаго (STP Santiago) и Вуле Бус (Buses Vule). Током 2019 и 2020. године настављена је даља набавка аутобуса на електрични погон. На крају јуна 2020. године 405 аутобуса на електрични погон је у раду у Сантјаго де Чиле, од чега је 305 аутобуса на електрични погон произвођача BYD [111].

У Еквадору, град Гуаљакил спровео је пробно тестирање од новембра 2017. до марта 2018. године са једним аутобусом произвођача BYD након чега је уговорена испорука 20 аутобуса на електрични погон [118]. Произвођач BYD победио је на тендеру за набавку 64 аутобуса на електрични погон у Колумбијском граду Медељин са роком испоруке у другој половини 2019. године. У Аргентини од јула 2019. године, 12 аутобуса на електрични погон произвођача BYD и 6 произвођача Zhongtong налазе се у редовном саобраћају у граду Мендоза. Јужноамерички градови: Буенос Аирес, Панама сити, Сан Хозе планирају набавку аутобуса на електрични погон у блиској будућности [118]. Од 28. маја 2020. године 20 аутобуса на електрични погон произвођача BYD налази се у редовној експлоатацији у главном граду Уругваја Монтевидеу [119].

#### **4.5 Увођење аутобуса на електрични погон на Новом Зеланду и Аустралији**

Производња електричне енергије на Новом Зеланду заснива се у високом проценту од 85% на обновљивим изворима, што представља добру основу за масовније коришћење аутобуса на електрични погон. У фебруару 2017. године спроведен је шестомесечни тест са аутобусом произвођача BYD у градовима Окланд и Велингтон ради сагледавања могућности примене у веома специфичним топографским условима рада на трасама линија које су присутне у овим градовима [120]. Одлуком Регионалне владе Велингтона (Wellington Regional Council) одлучено је да на 8 линија јавног градског превоза од 1. јула 2018. године буду у раду 32 спратна аутобуса на електрични погон. У Аустралији у граду Канбера у августу 2017. године спроведен је једногодишњи тест са три аутобуса на електрични погон који су се користили за школски и приградски превоз. У граду Аделаида спроведен је тест са 2 аутобуса на електрични погон у оквиру пројекта који је финансирала Влада Јужне Аустралије (South Australian Government). У априлу 2019. години у Мелбурну је започета испорука првих 30 хибридних plug-in аутобуса произвођача Volvo, преосталих 20 аутобуса биће испоручено до 2022. године [121]. Карактеристика ових возила је да имају 80% рад у електричном режиму. Град Бризбејн има у плану набавку 60 аутобуса на потпуно електрични погон произвођача Хес (Hess) дужине 24,5m. Свих 60 аутобуса треба да буде у раду до 2023. године [122].

#### **4.6 Преглед произвођача аутобуса на електрични погон**

Аутобуси на електрични погон као релативно нова технологија, имају тенденцију сталног усавршавања и напретка пре свега система за складиштење електричне енергије (батерије, суперкондензатор), система за пуњење електричном енергијом возила, система за контролу и управљања вучом, оптимизације

потрошње енергије, смањење масе празног возила. У овом тренутку готово сви светски произвођачи аутобуса у свом производном програму имају и аутобусе на електрични погон различитих дужина: миди (8÷9 m), стандард (11÷13 m), зглобни (18÷19 m) и дво-зглобне (24÷27 m) и они су постали део стандардне понуде на тржишту аутобуса. Према Извештају бр. 2 пројекта ЗЕУС (ZeEUS, E-bus report #2) из октобра 2017. године на тржишту Европе регистрована су 32 произвођача аутобуса на електрични погон и 8 произвођача опреме и система за пуњење електричном енергијом [102]. Најзаступљенији произвођачи аутобуса на електрични погон који су тренутно присутни на Европском тржишту су: БИД (BYD), ВДЛ (VDL), Соларис бус (Solaris&bus), Волво (Volvo), Камаз, ГАЗ, Јутонг (Yutong), Ебуско (Ebusco), Оптере (Optare), Кетано (Caetano), Шкода (Skoda), Иризар (Irizar), Ван Хул (Van Hool). Водећи произвођачи опреме и система за пуњење електричном енергијом аутобуса на електрични погон су: АББ (ABB), Siemens, Шунк (Shunk), Јема Енерџи (Jema Energy), Бомбардиер Прајмув (Bombardier Primove).

#### 4.7 Даљи правци увођење аутобуса на електрични погон у Европи и свету

На основу приказаних трендова пораста броја аутобуса на електрични погон који се налазе у раду широм света, великог броја тендерских процедура широм света које се односе на куповину аутобуса на електрични погон, све већом понудом на тржишту од стране готово свих произвођача аутобуса, позитивних искустава у експлоатацији и законских регулатива које прописују све веће учешће "чистих" аутобуса у транспортним системима градова, што се најбоље види на примеру држава чланица Европске Уније (Directive 94/2014/EC), доказана је полазна *Хипотеза 1*.

#### 4.8 СВОТ (SWOT) анализа увођења аутобуса на електрични погон

Увођење аутобуса на електрични погон у систем јавног градског транспорта треба анализирати са аспеката предности, слабости, могућности и изазова који се постављају пред овај концепт градског аутобуса. SWOT анализа се може приказати кроз:

##### ПРЕДНОСТИ (S-Strengths):

- нулта емисија штетних гасова на локалном нивоу (TTW), нижи ниво емисије CO<sub>2</sub> посматрано на глобалном нивоу (WTW) у поређењу са аутобусима на дизел гориво или КПП,
- нижи ниво емисије буке у поређењу са аутобусима са СУС моторима,
- већа енергетска ефикасност погонског система у поређењу са СУС моторима,
- боље возно-динамичке перформансе (обртни момент, снага) у поређењу са аутобусима са СУС моторима, могућност регенеративног кочења и рекуперације,
- једноставније и јефтиније одржавање аутобуса у поређењу са дизел и аутобусима на КПП,
- нижи трошкови утрошка погонске енергије у поређењу са дизел и аутобусима на КПП (електрична енергија је вишеструко јефтинија од дизел горива или КПП).

**СЛАБОСТИ (W-Weaknesses):**

- висока набавна цена Е-буса која је двоструко већа од аутобуса са дизел погоном (Еуро 6),
- условљеност увођења Е-буса од расположивих енергетских капацитета или додатном изградњом капацитета (трафо станице),
- трошкови пуњача, посебно пуњача за брзо пуњење,
- нижи транспортни капацитет у поређењу са дизел аутобусима, посебно код аутобуса на електрични погон који користе батерије великог капацитета,
- високи трошкови замене најмање једног сета батерије у животном веку возила,
- аутобуси који користе суперкондензатор због малог капацитета могу да раде само на дефинисаној линији где постоје пуњачи (мала флексибилност),
- аутобуси на електрични погон са спорим пуњењем током ноћи захтевају посебне паркинг површине и велику истовремену ангажовану електричну снагу за рад пуњача,
- утицај система за грејање и хлађење возила на повећану потрошњу електричне енергије, што се неповољно одражава на планирану аутономију на линији код аутобуса са суперкондензатором или на нивоу радног дана код аутобуса са батеријама и спорим пуњењем,
- трошкови рециклаже батерија и суперкондензатора.

**МОГУЋНОСТИ (O-Opportunities):**

- веома добра понуда Е-буса на тржишту, различитих превозних капацитета (миди, стандардни, зглоб), различитих снага и конфигурација погонских електромотора, капацитета и типа батерија и суперкондензатора, брзине пуњења, што омогућава избор оптималног типа возила,
- коришћење електричне енергије из потпуно обновљивих извора (ветрогенератори, фотонапонске ћелије),
- смањење зависности од фосилних горива,
- финансирање пројеката увођења Е-буса из "зелених" ЕУ-фондова, субвенције од стране државе или локалне управе,
- коришћење аутобуса на електрични погон у пешачким зонама, еколошки заштићеним подручјима и аеродромима,
- промовисање градова или компанија као друштвено одговорних субјеката у спровођењу мера унапређења одрживог транспортног система (E-mobility, Smart City ...).

**ИЗАЗОВИ (T-Threats):**

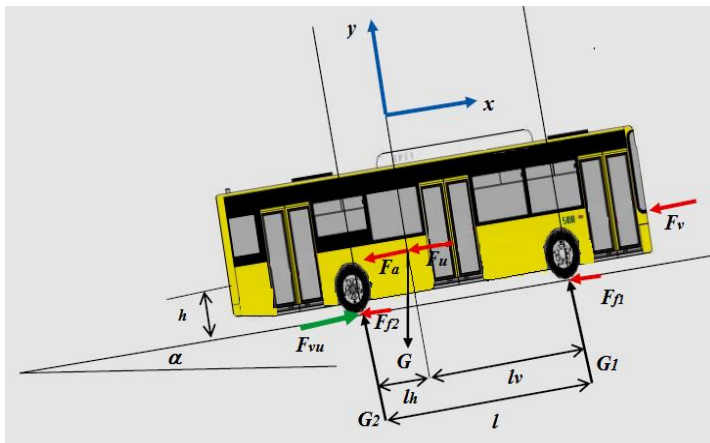
- нова технологија која има стални тренд развоја и која ће бити све присутнија у будућем периоду,
- конкуренција са другим алтернативним погонским системима: хибридни погон, тролејбус са аутономијом, горивне ћелије,
- унапређење законске регулативе, неколико различитих стандарда код опреме за пуњење,
- интеграција пројеката увођења аутобуса на електрични погон са плановима развоја транспортног система градова.

## 5. ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ КРЕТАЊА И РЕГЕНЕРАТИВНОГ КОЧЕЊА АУТОБУСА НА ЕЛЕКТРИЧНИ ПОГОН

Анализа основних вучно динамичких карактеристика аутобуса на електрични погон може се посматрати у контексту опште теорије кретања и кочења моторних возила [123, 124, 125] и специфичности возила са електро-погоном [75, 126, 127, 128].

### 5.1 Анализа отпора кретања аутобуса на електрични погон

При кретању возила а самим тим и аутобуса на електрични погон присутни су отпори: котрљања, ваздуха, успона и инерције. Вучна сила на погонским точковима потиче од погонског електромотора. Присутне су и силе поремећаја на возило у правцу војње, као што је ветар који може да убрзава или успорава возило или да има бочно дејство. Силе поремећаја се могу занемарити с обзиром да се вучно-динамичке карактеристике рачунају само на основу сила отпора котрљања, нагиба пута, ваздуха и инерцијалних сила. Приказ свих отпора у фази кретања аутобуса на електрични погон у "x-y" равни координатног система, приказано је на слици 5.1.



Слика 5.1 Приказ отпора у фази кретања аутобуса на електрични погон

$F_{vu}$  – вучна сила на погонским точковима, N,

$F_{f1}, F_{f2}$  – отпор котрљања точкава предње и задње (погонске) осовине, N,

$F_v$  – отпор ваздуха, N,

$F_u$  – отпор успона, N,

$F_a$  – отпор инерције, N,

$G$  – тежина возила, N,

$G_1$  – динамичка реакција подлоге на предњим точковима, N,

$G_2$  – динамичка реакција подлоге на задњим точковима, N,

$\alpha$  – угао нагиба пута, °,

$h$  – висина тежишта возила од тла, m,

$l$  – међуосовинско растојање Е-буса, m,

$l_h$  – растојање од тежишта Е-буса до задње осовине, m,

$l_v$  – растојање од тежишта Е-буса до предње осовине, m.

Укупна потребна вучна сила је:

$$F_{vu} = F_f + F_v \pm F_u \pm F_a. \quad (5.1)$$

Један од најважнијих улазних елемената прорачуна отпора котрљања, отпора нагиба пута и отпора инерцијалних сила јесте маса возила. Генерално, код аутобуса који се користе у градском превозу она је променљива с обзиром на различит број путника који се налази у возилу између станица. Код аутобуса на електрични погон додатно оптерећење представља маса батерије или суперкондензатора, тако да је маса празног аутобуса на електрични погон увек већа у односу на аутобус са дизел или КПП погоном. Маса батерије пропорционална је капацитету батерије или суперкондензатора. Маса аутобуса на електрични погон може се представити изразом:

$$m_{ebus} = m_{pebus} + Z \cdot m_{put}, \quad (5.2)$$

где је:

$m_{ebus}$  – укупна маса Е-бус, kg,

$m_{pebus}$  – маса празног Е-бус, kg,

$Z$  – број путника у возилу,

$m_{put}$  – просечна маса путника, kg.

У возилима јавног градског превоза просечна маса путника усваја се да је 68 kg [129] с обзиром да структура путника подразумева све категорије популације (одрасли, стара лица, ученици, студенти, деца).

Отпор котрљања јавља се у контакту пнеуматика и подлоге по којој се креће возило и може се представити изразом:

$$F_f = m_{ebus} \cdot g \cdot f \cdot \cos\alpha, \quad (5.3)$$

где је:

$F_f$  – отпор котрљања, N,

$g$  – гравитационо убрзање,  $m \cdot s^{-2}$ ,

$f$  – коефицијент отпора котрљању,

$\alpha$  – угао нагиба пута, °.

Претпоставка је да се аутобуси на електрични погон крећу градским улицама са асфалтном подлогом доброг квалитета ређе са бетонском подлогом. Вредност коефицијента отпора котрљања код радијалних пнеуматика може се исказати у функцији брзине кретања аутобуса и стања подлоге асфалта, емпиријски одређеним изразом [41,123]:

$$f = (0,0041 + 0,000041 \cdot v_{ebus} \cdot 2,24) \cdot k_{as}, \quad (5.4)$$

где је:

$v_{ebus}$  – брзина кретања Е-буса,  $m \cdot s^{-1}$ ,

$k_{as}$  – коефицијент квалитета асфалтне подлоге (усвојено 1,2) [41,123].

Приликом кретања аутобуса на електрични погон јавља се отпор ваздуха и може се представити изразом:



$$F_v = 0,5 \cdot C_v \cdot \rho_v \cdot A_{ebus} \cdot v_{ebus}^2, \quad (5.5)$$

где је:

$F_v$  – отпор ваздуха, N,  
 $A_{ebus}$  – чеона површина возила, m<sup>2</sup>,  
 $\rho_v$  – густина ваздуха, kg·m<sup>-3</sup>,  
 $C_v$  – коефицијент отпора ваздуха.

Саобраћајнице у градовима и ван градским подручјима по којима се крећу возила карактерише присуство уздужних успона и падова. При савладавању деоница са успоном неопходна је додатна снага погонског система. При савладавању деоница са падовима смањује се потребна снага погонског система и може се појавити потреба за кочењем. Отпор нагиба пута може имати позитивни или негативни предзнак. У случају аутобуса на електрични погон отпор нагиба пута на деоници са успоном представљена је изразом:

$$F_u = m_{ebus} \cdot g \cdot \sin \alpha, \quad (5.6)$$

где је:

$F_u$  – отпора нагиба пута, N,  
 $\alpha$  – угао нагиба пута, °.

Нагиб пута се често изражава у процентима што представља тангенс угла коју има саобраћајница у односу на хоризонталну осу и може се представити изразом:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{u[\%]}{100}, \quad (5.7)$$

где је:

$u$  – успон, %.

За случај кретања аутобуса на електрични погон на саобраћајницама са малим нагибом може се усвојити једнакост:

$$\sin \alpha \approx \operatorname{tg} \alpha. \quad (5.8)$$

На основу првог Њутновог (Newton) закона свака промена брзине кретања тела изазива инерцијалну силу која је пропорционална маси и убрзању. Смер инерцијалне силе транслаторног кретања супротан је смеру убрзања односно успорења. Отпор инерцијалних сила аутобуса на електрични погон је:

$$F_a = m_{ebus} \cdot a_{ebus} = m_{ebus} \cdot \frac{dv_{ebus}}{dt}, \quad (5.9)$$

где је:

$F_a$  – отпор убрзања, N,  
 $a_{ebus}$  – убрзање Е-буса, m·s<sup>-2</sup>,  
 $v_{ebus}$  – брзина кретања Е-буса, m·s<sup>-1</sup>.

Поред транслаторног кретања возила мора се узети у обзир и утицај ротирајућих маса појединих компоненти аутобуса на електрични погон: ротор електромотора, трансмисија и точкови. Због тога се у прорачун уводи емпиријски коефицијент учешћа ротирајућих маса, који се може представити у облику [60]:

$$\delta = 1 + \frac{\sum_{w=1}^4 J_{iw}}{m_{ebus} \cdot r_d^2}, \quad (5.10)$$

где је:

$\delta$  – коефицијент ротирајућих маса,

$J_{iw}$  – момент инерције обртних маса система преноса снаге (трансмисије) и точкава Е-буса, сведен на динамички полупречник точка,  $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ,

$w = 1, 2, 3, 4$  – точки Е-буса (точки 3, 4 су удвојени),

$r_d$  – динамички полупречник точка,  $\text{m}$ .

Емпиријска вредност коефицијента ротирајућих маса са довољном тачношћу може се одредити у облику [130]:

$$\delta = 1 + 0,05 \cdot \frac{m_{ebus}}{m'_{ebus}}, \quad (5.11)$$

где је:

$m'_{ebus}$  – максимална дозвољена маса Е-бус,  $\text{kg}$ .

Укупни отпор инерцијалних сила након увођења коефицијента ротирајућих маса има облик:

$$F_a = m_{ebus} \cdot a_{ebus} \cdot \delta. \quad (5.12)$$

Код стандардног градског аутобуса на електрични погон, просечна вредност коефицијента ротирајућих маса може се усвојити да је приближно 1,035 [28]. Коришћењем израза (5.11) за празан и потпуно оптерећен стандардни градски аутобус на електрични погон вредност коефицијента ротирајућих маса је између  $1,03 \div 1,05$ .

Пренос обртног момента са ротора погонског електромотора до точкава остварује се преко система преноса снаге. Зависно од конструкције најчешће се код аутобуса на електрични погон примењују следећа решења:

- Електромотор, кардански преносник, главни преносник, погонски точкиви;
- Електромотор, редуктор, кардански преносник, главни преносник, погонски точкиви;
- Електромотор, редуктор, погонски точак;
- Електромотор, погонски точак.

У систему преноса снаге јављају се механички отпори, такозвани унутрашњи губици, који се изражавају преко коефицијента корисног дејстава:

$$\eta_t = \eta_r \cdot \eta_{kv} \cdot \eta_{gp}, \quad (5.13)$$

где је:

$\eta_t$  – укупни коефицијент корисног дејства система преноса снаге,

$\eta_r$  – коефицијент корисног дејства редуктора,

$\eta_{kv}$  – коефицијент корисног дејства карданског вратила,

$\eta_{gp}$  – коефицијент корисног дејства главног преносника.

У табели 5.1 приказане су вредности коефицијента корисног дејства појединих компоненти система преноса снаге код аутобуса на електрични погон [131].

Табела 5.1 Коефицијент корисног дејства компоненти система преноса снаге

|             |           |
|-------------|-----------|
| $\eta_r$    | 0,96÷0,98 |
| $\eta_{kv}$ | 0,98÷1    |
| $\eta_{gp}$ | 0,94÷0,98 |

Вредност укупног коефицијента корисног дејства трансмисије  $\eta_t$  код аутобуса на електрични погон је најчешће између 0,93 и 0,97.

## 5.2 Перформансе погонског система аутобуса на електрични погон

Прорачун перформанси погонског система код аутобуса на електрични погон односи се на прорачун обртног момента и потребне снаге коју погонски електромотор мора да обезбеди ради савлађивања сила отпора кретања возила.

Потребна снага за кретање аутобуса на електрични погон у фази убрзавања и вожње са константном брзином одређена је изразом:

$$P_{mov} = (F_f + F_v \pm F_u + F_a) \cdot v_{ebus}, \quad (5.14)$$

где је:

$P_{mov}$  – потребна снага за кретање Е-буса, W.

Обртни момент тачкова погонске осовине одређен је једначином:

$$\sum_{j=3}^4 M_{tj} = F_{vu} \cdot r_d, \quad (5.15)$$

где је:

$M_{tj}$  – обртни момент тачкова погонске осовине, Nm,

$j=3,4$  – тачкови погонске осовине,

$r_d$  – динамички полупречник тачка, m.

Ток електричне и механичке снаге за кретање Е-буса представљен је на слици 5.2. Из система за складиштење електричне енергије (батерија или суперкондензатор) активна електрична снага се допрема инвертору и погонском електромотору, који чине један систем, одакле се механичка снага преко трансмисије преноси до погонских тачкова возила.



Слика 5.2 Токови електричне и механичке снаге код Е-буса

Наведени токови електричне и механичке снаге имају облик:

$$P_{uc} \cdot \eta_{uc} = P_{em}, \quad (5.16)$$

$$P_{em} \cdot \eta_i \cdot \eta_{em} = P_{em_M}, \quad (5.17)$$

$$P_{em_M} \cdot \eta_t = \sum_{j=3}^4 M_{tj} \cdot \omega_{tj}, \quad (5.18)$$

$$P_{em_M} = \frac{M_{em} \cdot i_t \cdot v_{ebus}}{r_d}, \quad (5.19)$$

$$\frac{M_{em} \cdot i_t \cdot v_{ebus}}{r_d} \cdot \eta_t = \sum_{j=3}^4 M_{tj} \cdot \omega_{tj}, \quad (5.20)$$

$$M_{em} = \sum_{j=3}^4 M_{tj} \cdot (\eta_t \cdot i_t)^{-1}, \quad (5.21)$$

где је:

$P_{uc}$  – снага електричног извора (батерија или суперкондензатор), W,

$P_{em}$  – активна електрична снага погонског електромотора, W,

$P_{em_M}$  – излазна (механичка) снага погонског електромотора, W,

$M_{em}$  – обртни момент електромотора (режим погона), Nm,

$\eta_{uc}$  – коефицијент корисног дејства суперкондензатора или батерије и проводника,

$\eta_{em}$  – коефицијент корисног дејства електромотора (режим погона),

$\eta_i$  – коефицијент корисног дејства инвертора,

$i_t$  – укупни преносни однос система преноса снаге (трансмисије),

$\omega_{tj}$  – угаона брзина обртања тачкова погонске осовине,  $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Број обртаја погонског електромотора одређен је изразом [41,75]:

$$n_o = \frac{v_{ebus} \cdot 60 \cdot i_t}{2\pi \cdot r_d}, \quad (5.22)$$

где је:

$n_o$  – број обртаја погонског електромотора,  $\text{min}^{-1}$ .

Тако да једначина 5.20 има облик:

$$\frac{M_{em} \cdot n_o \cdot 2\pi}{60} \cdot \eta_t = \sum_{j=3}^4 M_{tj} \cdot \omega_{tj}, \quad (5.23)$$

Активна електрична снага погонског електромотора у режиму убрзавања возила пропорционална је величини тренутне јачине једносмерне струје и напона коју електромотор преузима из суперкондензатора или батерије и одређена је изразом:

$$P_{em} = U_t \cdot I_t, \quad (5.24)$$

где је:

$U_t$  – тренутна вредност напона електромотора, V,

$I_t$  – тренутна вредност јачине струје електромотора, A.

Активна електрична снага погонског електромотора преузета из суперкондензатора или батерије може се исказати у функцији обртног момента, броја обртаја погонског електромотора и коефицијента корисног дејства инвертора и електромотора релацијом [41,75]:

$$P_{em} = \frac{M_{em} \cdot n_o \cdot 2\pi}{60 \cdot \eta_{em} \cdot \eta_i}, \quad (5.25)$$

тако да важи релација:

$$U_t \cdot I_t = \frac{M_{em} \cdot n_o \cdot 2\pi}{60 \cdot \eta_{em} \cdot \eta_i}. \quad (5.26)$$

Снага електричних губитака у електромотору и инвертору зависи од коефицијента корисног дејства рада ова два система и може се представити једначином:

$$P_{gem} = P_{em} \cdot (1 - \eta_{em} \cdot \eta_i), \quad (5.27)$$

На основу приказаних једначина следи да је:

$$P_{em_M} = P_{em} - P_{gem}. \quad (5.28)$$

Снага механичких губитака у трансмисији одређена је релацијом:

$$P_{gtr} = P_{em_M} \cdot (1 - \eta_t), \quad (5.29)$$

где је:

$P_{gtr}$  – снага механичких губитака у трансмисији, W.

Излазна (механичка) снага погонског електромотора може се представити једначином:

$$P_{em_M} = P_{mov} + P_{gtr}. \quad (5.30)$$

Ако се рад погонског електромотора посматра у режиму убрзавања возила или кретања са константном брзином у неком временском интервалу, утрошена електрична енергија може се представити једначином:

$$E_{em} = \int_{t_1}^{t_2} U_t \cdot I_t \cdot dt, \quad (5.31)$$

где је:

$E_{em}$  – утрошена електрична енергија погонског електромотора-инвертора, J,

$t_1$  – почетно време, s,

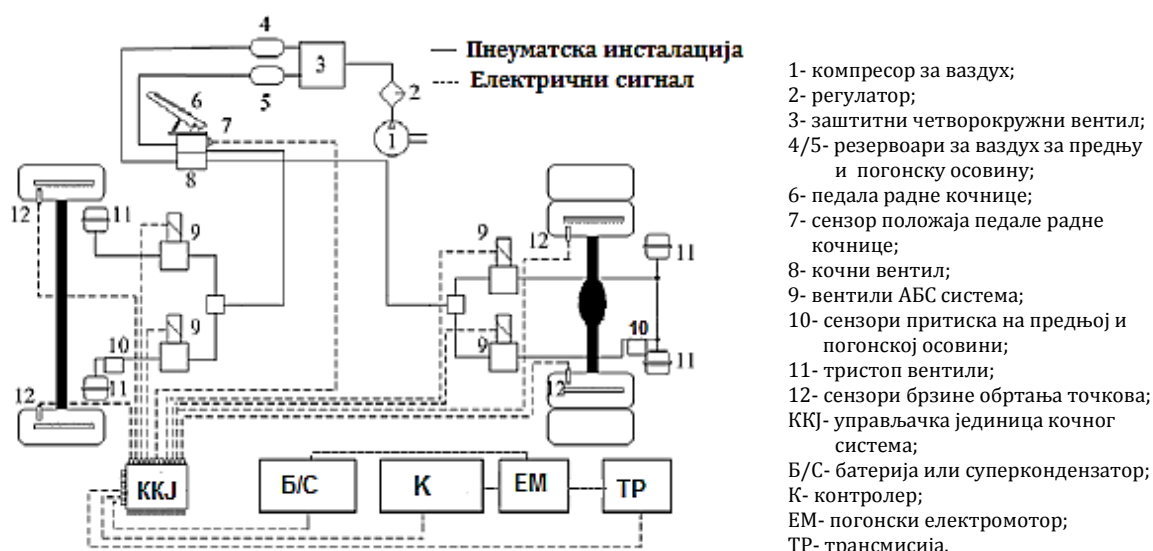
$t_2$  – крајње време, s.

### 5.3 Анализа регенеративног кочења аутобуса на електрични погон

Аутобуси на електрични погон морају да испуњавају све захтеве правилника UN ECE R13 који се односи на кочни систем возила.

Кочни систем код аутобуса на електрични погон представља обједињен систем два независна кочна система и то: пнеуматског кочног система који делује на све тачкове управљачке и погонске осовине, као и система регенеративног кочења који делује на погонске тачкове када погонски електромотор ради у генераторском режиму и када поред кочног момента који делује на погонске тачкове постоји и рекулерација електричне енергије која се складишти у батерије или суперкондензатор и тако чини Е-бус енергетски још ефикаснијим.

На слици 5.3 приказана је блок шема једног таквог обједињеног кочног система код Е-буса [42].



Слика 5.3 Блок шема интегрисаног кочног система код Е-буса

Током процеса кочења Е-буса, управљачка јединица кочног система прима одговарајуће електричне сигнале (информације) преко CAN мреже Е-буса. На основу тренутних вредности улазних сигнала (брзина возила, интензитет кочења, притисак у кочном систему, степен напуњености батерије или суперкондензатора, број обртаја електромотора, број обртаја тачкова Е-буса, преносни однос трансмисије) који се дистрибуира преко CAN мреже врши се израчунавање расподеле силе кочења, одређује начин кочења у складу са стратегијом уграђеном у контролер, регулише рад АБС вентила, прецизно регулише притисак ваздуха предњег и задњег кочног кола, односно интензитета кочних сила и момент регенеративног кочења, при чему електромотор ради као генератор производећи електричну енергију која се складишти у батерију или суперкондензатор.

При регенеративном кочењу Е-буса од велике важности је контрола степена напуњености система за складиштење електричне енергије, посебно код батерије ради њене заштите од прекомерне јачине струје пуњења што је случај за  $SOC > 95\%$  или појаве тренутних високих вредности јачине струје пуњења у случају форсираног кочења [42].

У случају форсираног кочења када долази до блокирања точкова погонске осовине активира се ABS систем при чему престаје регенеративно кочење [42]. При малим брзинама кретања Е-буса, испод  $5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , када се кочи возило ефекат регенеративног кочења се може занемарити [42]. Ако се кретање аутобуса на електрични погон анализира у фази кочења, ток електричне и механичке енергије представљен је на слици 5.4.



Слика 5.4 Токови електричне и механичке енергије код Е-буса у фази кочења

Општи модели за прорачун биланса сила у фази кочења аутобуса на електрични погон могу се представити једначинама:

$$F_{koc} = F_b - F_f - F_v \pm F_u, \quad (5.32)$$

$$F_{koc} = F_{ki} + F_{kj} + F_{rkj}, \quad (5.33)$$

$$F_{ki} = \gamma \cdot F_{koc}, \quad (5.34)$$

$$(F_{kj} + F_{rkj}) = (1 - \gamma) \cdot F_{koc}, \quad (5.35)$$

где је:

$F_{koc}$  – укупна сила кочења аутобуса на електрични погон, N,

$F_{ki}$  – силе кочења пнеуматског система на предњој осовини Е-буса, N,

$F_{kj}$  – силе кочења пнеуматског система на задњој (погонској) осовини Е-буса, N,

$F_{rkj}$  – сила регенеративног кочења на погонској осовини, N,

$F_b$  – инерцијална сила при кочењу, N,

$\gamma$  – коефицијент расподеле кочне силе на предњу осовину Е-буса.

Сила кочења при кочењу свим точковима сразмерна је производу масе возила гравитационог убрзања и коефицијента приањања којег је могуће остварити између подлоге пута и пнеуматика, што се може представити изразом:

$$F_{koc} = m_{ebus} \cdot g \cdot \mu \cdot \cos\alpha, \quad (5.36)$$

где је:

$F_{koc}$  – укупна сила кочења аутобуса на електрични погон, N,

$\mu$  – вредност коефицијента пријањања подлоге и пнеуматика.

Снага кочења аутобуса на електрични погон има следећи облик:

$$P_{ki} + P_{kj} + P_{rkj} = \sum_{i=1}^2 M_{ki} \cdot \omega_{ki} + \sum_{j=3}^4 M_{kj} \cdot \omega_{kj} + \eta_t \sum_{j=3}^4 M_{rkj} \cdot \omega_{kj}, \quad (5.37)$$

где је:

$P_{ki}$  – снага кочења точкова предње осовине од пнеуматског система, W,

$P_{kj}$  – снага кочења точкова погонске осовине од пнеуматског система, W,  
 $P_{rkj}$  – механичка снага кочења точкова погонске осовине од  
 регенеративног кочења, W,  
 $M_{ki}$  – кочни момент точкова предње осовине од пнеуматског система, Nm,  
 $M_{kj}$  – кочни момент точкова погонске осовине од пнеуматског система, Nm,  
 $M_{rkj}$  – кочни момент точкова погонске осовине од регенеративног кочења, Nm,  
 $\omega_{ki}$  – угаона брзина точкова предње осовине при дејству  $M_{ki}$ ,  $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  
 $\omega_{kj}$  – угаона брзина точкова погонске осовине при дејству  $M_{kj}$ ,  $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  
 $i=1,2$  – точкови предње осовине,  
 $j=3,4$  – точкови погонске осовине.

При кочењу аутобуса на електрични погон, ако на точковима погонске осовине дејствује само регенеративни кочни момент приказан изразом:

$$\sum_{j=3}^4 M_{rkj} = F_{rkj} \cdot r_d, \quad (5.38)$$

механичка снага регенеративног кочења  $P_{rkj}$  која се преко точкова погонске осовине и система преноса снаге (трансмисије) преноси до електромотора одређена је једначином:

$$\eta_t \sum_{j=3}^4 \frac{M_{rkj} \cdot v_{ebus}}{r_d} = P_{rkj}, \quad (5.39)$$

Електрична снага електромотора (режим генератора) у току регенеративног кочења је:

$$P_{emg} = \frac{M_{emr} \cdot v_{ebus} \cdot i_t}{r_d}, \quad (5.40)$$

где је:

$P_{emg}$  – снага погонског електромотора у режиму генератора, W,  
 $M_{emr}$  – обртни момент погонског електромотора у режиму генератора, Nm.

Тако да важе релације:

$$\eta_t \sum_{j=3}^4 \frac{M_{rkj} \cdot v_{ebus}}{r_d} = \frac{M_{emr} \cdot v_{ebus} \cdot i_t}{r_d}, \quad (5.41)$$

$$M_{emr} = \sum_{j=3}^4 (M_{rkj} \cdot \eta_t) \cdot i_t^{-1}. \quad (5.42)$$

Снага електромотора у режиму генератора одређена је изразом:

$$P_{emg} = U_{tr} \cdot I_{tr}, \quad (5.43)$$



где је:

$P_{emg}$  – снага електромотора у режиму генератора, W,

$U_{tr}$  – тренутна вредност напона електромотора, V,

$I_{tr}$  – тренутна вредност јачине струје електромотора у режиму генератора, A.

Генерисана електрична енергија може се представити једначином:

$$E_{emg} = \int_{t_1}^{t_2} U_{tr} \cdot I_{tr} \cdot dt , \quad (5.44)$$

где је:

$E_{emg}$  – генерисана електрична енергија електромотора у режиму генератора, J.

Снага електричних губитака у електромотору и инвертору у режиму генератора у току регенеративног кочења и рекуперације може се исказати једначином:

$$P_{gemr} = P_{emg} \cdot (1 - \eta_{emr} \cdot \eta_i) , \quad (5.45)$$

где је:

$P_{gemr}$  – снага електричних губитака у електромотору и инвертору у режиму генератора, W,

$\eta_{emr}$  – коефицијент корисног дејства електромотора у режиму генератора,

$\eta_i$  – коефицијент корисног дејства инвертора.

Излазна електрична снага (снага рекуперације) из система погонски електромотор и инвертор у режиму генератора при регенеративном кочењу једнака је:

$$P_{emr} = P_{emg} - P_{gemr} , \quad (5.46)$$

или ако је исказана преко тренутних вредности струје и напона приказана је једначином:

$$P_{emr} = U_{tr} \cdot I_{tr} \cdot \eta_{emr} \cdot \eta_i , \quad (5.47)$$

где је:

$P_{emr}$  – излазна електрична снага рекуперације, система електромотор-инвертор у режиму генератора, W,

$U_{tr}$  – тренутна вредност напона електромотора, V,

$I_{tr}$  – тренутна вредност јачине струје електромотора у режиму генератора, A ,

$\eta_{emr}$  – коефицијент корисног дејства електромотора у режиму генератора,

$\eta_i$  – коефицијент корисног дејства инвертора.

Ако се регенеративно кочење посматра у неком временском интервалу, електрична енергија рекуперације коју систем електромотор-инвертор производи, приказана је интегралом:

$$E_{emr} = \int_{t_1}^{t_2} U_{tr} \cdot I_{tr} \cdot \eta_{emr} \cdot \eta_i \cdot dt , \quad (5.48)$$

где је:

$E_{emr}$  – електрична енергија рекуперације система електромотор-инвертор, J,

$t_1$  – почетно време, s,

$t_2$  – крајње време, s.

## 6. ПОТРОШЊА ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ АУТОБУСА НА ЕЛЕКТРИЧНИ ПОГОН

Мерење потрошње и рекуперације електричне енергије код аутобуса на електрични погон, према месту мерења може бити обављено на полигону, лабораторији на динамометријским ваљцима или у реалним условима рада на изабраној линији јавног градског транспорта.

Полигонска испитивања обављају се према унапред задатом возном циклусу на посебно припремљеним пистама у строго контролисаним условима у погледу квалитета подлоге пута, брзине ветра, спољне температуре, оптерећења возила, нагиба пута итд. Једна од најпознатијих методологија мерење потрошње енергије код свих типова аутобуса који се користе у градском превозу (дизел, КПГ, хибридни, електрични) која на најбољи начин осликава реалну експлоатацију аутобуса је SORT (Standardised On-Road Tests cycles), чији возни циклус се узима као основа за мерење потрошње горива код аутобуса са погоном на дизел гориво односно електричне енергије код аутобуса на електрични погон.

Суштина SORT-а је следећа: креирати одређени број возних циклуса на основу комбинације неколико основних циклуса (модула). Основни циклуси су: SORT 1 (градски циклус), SORT 2 (комбиновани градско-приградски) и SORT 3 (ванградски). Предложени циклус се реализује понављањем идентичног основног циклуса, кога карактерише просечна брзина, дужина и вожња под симулираним оптерећењем од 3.200 kg за аутобус стандардне дужине. Основни циклус чине "трапези" који одражавају услове вожње у јавном транспорту: честа заустављања са отварањем врата због укрцавања/искрцавања путника или због саобраћајних услова (семафори, загушења). Унутар "трапеза" дефинише се укупно време проведено у празном ходу, као и укупно трајање модула основног циклуса да би се постигла предвиђена средња брзина. Сваки од "трапеза" је дефинисан убрзавањем, вожњом константном брзином и фазом кочења, како је приказано у табели 6.1. [132].

Табела 6.1 SORT- структура основних циклуса

|   | <b>SORT 1</b> | <b>SORT 2</b> | <b>SORT 3</b> |
|---|---------------|---------------|---------------|
| Просечна брзина, km·h <sup>-1</sup>                 | 12,1          | 18            | 25,3          |
| Станица по километру                                | 5,8           | 3,3           | 2,1           |
| Време стајања, %                                    | 39,7          | 33,4          | 20,1          |
| Трапез 1: брзина, km·h <sup>-1</sup> , растојање, m | 20/100        | 20/100        | 20/100        |
| Убрзање, m·s <sup>-2</sup>                          | 1,03          | 1,03          | 0,77          |
| Трапез 2: брзина, km·h <sup>-1</sup> , растојање, m | 30/200        | 40/220        | 50/600        |
| Убрзање, m·s <sup>-2</sup>                          | 0,77          | 0,62          | 0,57          |
| Трапез 3: брзина, km·h <sup>-1</sup> , растојање, m | 40/220        | 50/600        | 60/650        |
| Убрзање, m·s <sup>-2</sup>                          | 0,62          | 0,57          | 0,46          |
| Време стајања, s                                    | 20/20/20      | 20/20/20      | 20/10/10      |
| Укупна дужина, m                                    | 520           | 920           | 1450          |
| Успорење, m·s <sup>-2</sup>                         | 0,8           | 0,8           | 0,8           |

SORT је званична методологија мерења потрошње дизел горива, КПГ и електричне енергије код аутобуса у градском превозу различитих погонских система у Европској унији и обавеза свих произвођача аутобуса да у тендерским процедурама потрошњу енергије декларишу према овој методологији. Методологија E-SORT за електрична возила се заснива на мерењу потрошње електричне енергије Е-буса на основу промене степена напуњености батерије SOC,

за сваки реализован возни циклус и исказује се у функцији пређеног пута [133], како је приказано у једначини:

$$E_{sort_{i,k}} = \frac{C_b \cdot (SOC_x - SOC_y)}{L_{sort_i} \cdot \eta_{ch}}, \quad (6.1)$$

где је:

$E_{sort_{i,k}}$  – потрошена електрична енергија Е-буса по километру, kWh·km<sup>-1</sup>,

$SOC_x$  – степен напуњености батерије на почетку возног циклуса, %,

$SOC_y$  – степен напуњености батерије на крају возног циклуса, %,

$C_b$  – максимални капацитет батерије, kWh,

$L_{sort_i}$  – дужина возног циклуса, km,

$i$  – тип возног циклус ( $i = 1, 2, 3$ ),

$k$  – редни број мерења ( $k = 1, 2, 3, \dots$ ),

$\eta_{ch}$  – коефицијент ефикасности пуњача.

Обрадом већег броја резултата мерења, врши се селекција три резултата са најмањим оствареним потрошњама

$$E_{sort_{i_{min1}}} < E_{sort_{i_{min2}}} < E_{sort_{i_{min3}}}, \quad (6.2)$$

Тако да је испуњен услов:

$$\frac{(E_{sort_{i_{min3}}} - E_{sort_{i_{min1}}})}{E_{sort_{i_{min1}}}} \cdot 100 < 2\%. \quad (6.3)$$

Ако је испуњен услов из израза 6.3, просечна вредност три селектована резултата мерења представља меродавну вредност мерења потрошње електричне енергије аутобуса на електрични погон за задати возни SORT циклус.

$$E_{sort_i} = \frac{E_{sort_{i_{min1}}} + E_{sort_{i_{min2}}} + E_{sort_{i_{min3}}}}{3}, \quad (6.4)$$

где је:

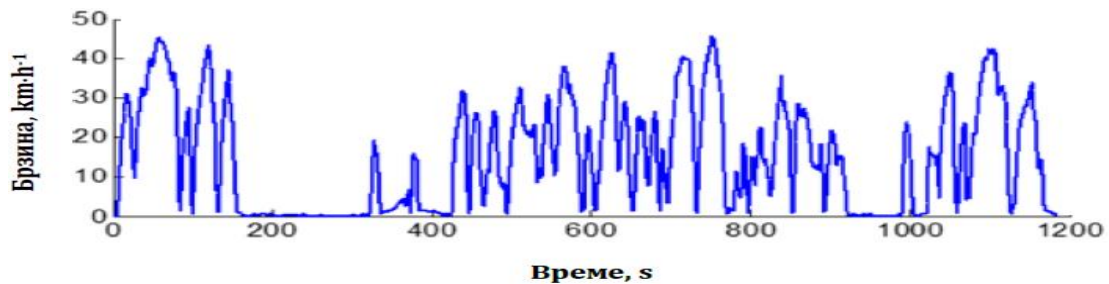
$E_{sort_i}$  – меродавна вредност потрошње електричне енергије Е-буса, по методи SORT, kWh·km<sup>-1</sup>.

Лабораторијска мерења потрошње електричне енергије код Е-буса раде се на ваљцима (chassis dynamometer) где се симулира одређени возни циклус. Најчешће су дефинисани према неким типичним и специфичним условима рада у неким градовима као што су Брауншвајг аутобуски циклус (Braunschwig bus cycle), Оранџ аутобуски циклус (Orange Country bus cycle), Њујорк циклус (New York cycle). На пример, Брауншвајг возним циклусом се симулира пређени пут од 10.870 m, који се реализује за 1.740 s, где је просечна брзина 22,5 km·h<sup>-1</sup> а максимална постигнута брзина 58 km·h<sup>-1</sup>. Режим рада мотора на празном ходу је 25% укупног времена рада [134].

У реалној експлоатацији аутобуси за градски транспорт раде на линијама чије су трасе унапред дефинисане и које имају одређени број станица. Најједноставнији

возни циклус на једном међустаничном растојању обухватао би фазу убрзавања, вожњу константном брзином и фазу успоравања аутобуса до заустављања на наредној станици. Овакав возни циклус може се сматрати „идеалним“, али у реалној експлоатацији он је ретко остварив, с обзиром да дуж трасе кретања возила, односно на одређеном међустаничном растојању постоје семафори, пешачки прелази и саобраћајни ток осталих возила који условљавају заустављања или успоравања аутобуса на том делу трасе.

На слици 6.1 представљен је пример реалног возног циклуса на једној линији јавног превоза [135].



Слика 6.1 Реални возни циклус на линији јавног превоза [135]

Према начину мерења резултати се могу добити помоћу: мерне опреме, података преузетих преко CAN мреже возила најчешће помоћу аквизиционих уређаја који се повезују са CAN мрежом, помоћу апликационог софтвера који аутобус на електрични погон већ располаже преко BMS система. Која ће се од метода користити зависи од постављеног циља мерења, расположиве опреме и времена трајања мерења.

Сprovedена мерења могу бити делимична или потпуна. Код делимичних (парцијалних) мерења, мери се укупно потрошена електрична енергија аутобуса на електрични погон у посматраном временском интервалу, праћењем промене степена напуњености батерије или суперкондензатора.

Код потпуног мерења, мери се појединачна потрошња електричне енергије: погонског електромотора, помоћних уређаја, система за грејање и хлађење путничког и возачевог простора као и рекулпација електричне енергије у фази кочења.

Највећи степен тачности мерења остварује се коришћењем мерне опреме. Нижи ниво тачности остварује се преузимањем података са CAN мреже возила и BMS контролне јединице Е-буса.

Најчешће мерне величине које се мере помоћу мерне опреме или преузимањем са CAN мреже возила и BMS система су: тренутни напон батерије или суперкондензатора, тренутна јачина струје пуњења/пражњења батерије или суперкондензатора, тренутна јачина струје за погон електромотора или тренутна јачина струје рекулпације коју генерише електромотор, тренутна вредност SOC, положај педале "гаса", положај педале кочнице, тренутни број обртаја електромотора.

Приказ најважнијих утицајних фактора на потрошњу електричне енергије код аутобуса на електрични погон приказан је у табели 6.2.

Табела 6.2 Приказ потрошње електричне енергије код Е-буса и утицајних фактора

| Е-бус, потрошачи електричне енергије | Утицај на потрошњу:  |
|--------------------------------------|--|
| Погонски електромотор                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Возни циклус: (убрзање, брзина кретања, број станица, број стајања због застоја...)</li> <li>• Оптерећење (број путника у возилу)</li> <li>• Топографија трасе</li> <li>• Стил вожње (еко стил, умерен, агресиван)</li> <li>• Перформансе Е-буса (маса празног возила, аеродинамика)</li> <li>• Губици (електромотор, инвертор, каблови, батерија, пуњач, трансмисија)</li> </ul> |
| Помоћни уређаји                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Компресор</li> <li>• Пумпа управљача</li> <li>• Спољно и унутрашње осветљење, дисплеји</li> <li>• Нисконапонска инсталација Е-буса</li> </ul>   |
| Систем за грејање Е-буса             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Сезонски-зима (спољна температура)</li> </ul>   |
| Систем за хлађење Е-буса             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Сезонски-лето (спољна температура)</li> </ul>   |

Потрошња електричне енергије аутобуса на електрични погон је сложена функција више конструкционих и експлоатационих утицајних фактора. Од конструкционих фактора најважнији су: маса празног возила, снага, обртни момент и ефикасност погонског електромотора, ефикасност инвертора, батерије, проводника, трансмисије и помоћних уређаја на возилу.

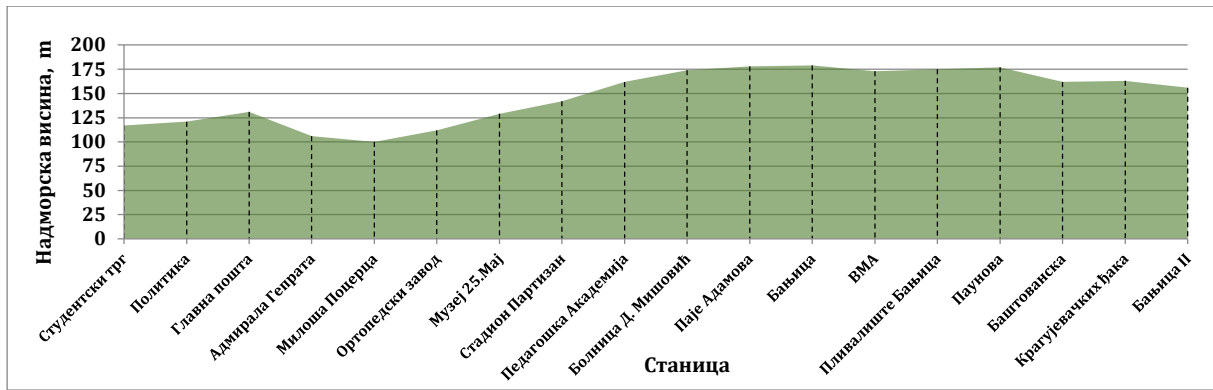
Експлоатациони фактори који су присутни током рада аутобуса на електрични погон на некој линији су: карактеристике возног циклуса, број путника у возилу, топографске карактеристике трасе, стил вожње возача, коришћење система за грејање и хлађење путничког простора.

### 6.1 Мерење потрошње електричне енергије код аутобуса на електрични погон са батеријама

Циљ овог истраживања био је сагледавање могућности коришћења електричних аутобуса у Београду и поређења енергетске ефикасности са аутобусима који за погоном користе дизел гориво.

Мерење потрошње електричне енергије на Е-бусу са батеријама, тип BYD E12, је обављено 12. априла 2014. године на линији бр. 41 (Студентски трг-Бањица II). По свом концепту Е-бус је имао спори тип пуњења. Возило је опремљено са два погонска асинхрона електромотора који су уграђени директно у погонске тачкове, максималне снаге 2x90 kW. Капацитет литијум ферофосфатне батерије је 324 kWh [136].

Градска линија бр. 41 (Студентски трг - Бањица II) представља типичну радијалну линију која повезује центар града са ширим градским језгром. Средња дужина линије износи 9,7 km. Број станица је 20 у смеру "А" и 18 у смеру "Б". Средња превозна брзина на линији је 17,5 km·h<sup>-1</sup>. На траси линије бр. 41 присутни су нагиби на међустаничним растојањима што је приказано на слици 6.2.



Слика 6.2 Вертикална карактеристика трасе линије бр. 41

Са становишта тежинских фактора експлоатације линију бр. 41 карактеришу интензивни путнички токови и често стајање, посебно у централној градској зони због великог броја семафора итд.

Методологија мерења потрошње електричне енергије код аутобуса на електрични погон BYD E12, заснива се на мерењу промене степена напуњености батерије (SOC) преко BMS система, за сваки полуобрт за смер "А" и смер "Б" које је возило остварило у току радног дана.

Податак о тренутној напуњености батерије преко система BMS увек је приказан преко дисплеја на инструмент табли возила и изражен је у процентима напуњености како је приказано на слици 6.3.



Слика 6.3 Дисплеј са тренутним стањем напуњености батерије код BYD E12

Праћењем промене степена напуњености батерије може се израчунати укупно потрошена електрична енергија преузета из дистрибутивне мреже аутобуса на електрични погон посматрано по смеру, што је представљено једначинама:

$$E_{ebus_{Ad}} = \sum_1^m \frac{C_b \cdot (SOC_{A_{pm}} - SOC_{A_{km}})}{\eta_{ch}}, \quad (6.5)$$

$$E_{ebus_{Bd}} = \sum_1^n \frac{C_b \cdot (SOC_{B_{pn}} - SOC_{B_{kn}})}{\eta_{ch}}. \quad (6.6)$$

Ако се вредности потрошене електричне енергије по смеровима саберу добија се укупно потрошена електрична енергија Е-буса на нивоу радног дана како је приказано у једначини:

$$E_{ebus_d} = E_{ebus_{A_d}} + E_{ebus_{B_d}}, \quad (6.7)$$

где је:

$E_{ebus_d}$  – укупна дневна потрошена електрична енергија Е-буса, kWh,

$E_{ebus_{A_d}}$  – потрошена дневна електрична енергија Е-буса у смеру "А", kWh,

$SOC_{A_{pm}}$  – почетни степен напуњености батерије у смеру "А", %,

$SOC_{A_{km}}$  – крајњи степен напуњености батерије у смеру "А", %,

$E_{ebus_{B_d}}$  – потрошена дневна електрична енергија Е-буса у смеру "Б", kWh,

$SOC_{B_{pn}}$  – почетни степен напуњености батерије у смеру "Б", %,

$SOC_{B_{kn}}$  – крајњи степен напуњености батерије у смеру "Б", %,

$m$  – број вожње у смеру "А",

$n$  – број вожње у смеру "Б",

$C_b$  – максимални капацитет батерије, kWh,

$\eta_{ch}$  – ефикасност пуњача ( $\sim 0,95$ ).

Ако се укупна потрошена електрична енергија аутобуса на електрични погон ( $E_{ebus_d}$ ) подели са укупним пређеним бројем километара на нивоу радног дана, добија се показатељ потрошње електричне енергије Е-буса, изражен у  $kWh \cdot km^{-1}$  који је погодан за поређења са другим врстама погонских система код аутобуса за градски транспорт.

$$E_{ebus_R} = \frac{E_{ebus_d}}{\sum_1^m L_A + \sum_1^n L_B}, \quad (6.8)$$

где је:

$E_{ebus_R}$  – показатељ укупне дневне потрошње Е-буса,  $kWh \cdot km^{-1}$ ,

$L_A$  – дужина трасе линије у смеру "А", km,

$L_B$  – дужина трасе линије у смеру "Б", km.

Показатељ потрошње електричне енергије може се исказати по смеровима кретања за сваки остварени полуобрт, чиме се добија увид у разлике у потрошњи које су последица специфичности трасе (успони, падови), стила вожње и режима рада (вршна оптерећења, међувршна оптерећења, први/задњи поласци, коришћење система за грејање и хлађење унутрашњости возила), како је приказано у једначинама:

$$E'_{ebus_{L_{Am}}} = \frac{C_b \cdot (SOC_{A_{pm}} - SOC_{A_{km}})}{\eta_{ch} \cdot L_A}, \quad (6.9)$$

$$E'_{ebus_{L_{Bn}}} = \frac{C_b \cdot (SOC_{B_{pn}} - SOC_{B_{kn}})}{\eta_{ch} \cdot L_B}, \quad (6.10)$$

где је:

$E'_{ebus_{L_{Am}}}$  - показатељ просечне потрошње Е-буса за остварену вожњу у смеру "А", kWh·km<sup>-1</sup>, са урачунатим губитком пуњења,

$E'_{ebus_{L_{Bn}}}$  - показатељ просечне потрошње Е-буса за остварену вожњу у смеру "Б", kWh·km<sup>-1</sup>, са урачунатим губитком пуњења.

Аутобус је био оптерећен џаковима песка укупне масе 2.500 kg, како би се симулирао просечан број путника који се налази у возилима. Возило је стајало на свим станицама где су се отварао врата и тиме се симулирало време потребно за излазак/улазак путника [50,137].

Током тестирања систем за грејање путничког простора био је искључен. У табели 6.3 представљени су резултати мерења потрошње електричне енергије аутобуса на електрични погон BYD E12 на линији 41 које је рађено 12. априла 2014. године [50,137].

Табела 6.3 Потрошња електричне енергије за BYD E-12

| С<br>м<br>е<br>р | Редни<br>број<br>мерења | $SOC_p$<br>% | $SOC_k$<br>% | $\Delta SOC$<br>% | $L_A, L_B$<br>km | Време<br>превоза<br>min | Потрошена<br>електрична<br>енергија<br>kWh | $E'_{ebus_{L_{Am}}}$<br>$E'_{ebus_{L_{Bn}}}$<br>kWh·km <sup>-1</sup> |
|------------------|-------------------------|--------------|--------------|-------------------|------------------|-------------------------|--|--|
| А                | 1.                      | 95           | 91           | 4,0               | 9,7              | 38                      | 12,96                                      | 1,41   |
|                  | 2.                      | 87           | 83           | 4,0               | 9,6              | 41                      | 12,96                                      | 1,42   |
|                  | 3.                      | 80           | 76           | 4,0               | 9,7              | 43                      | 12,96                                      | 1,41   |
|                  | 4.                      | 72,5         | 68,5         | 4,0               | 9,7              | 42                      | 12,96                                      | 1,41   |
| Б                | 1.                      | 91           | 87           | 4,0               | 9,9              | 45                      | 12,96                                      | 1,38   |
|                  | 2.                      | 83           | 80           | 3,0               | 9,8              | 38                      | 9,72                                       | 1,04   |
|                  | 3.                      | 76           | 72,5         | 3,5               | 9,9              | 40                      | 11,34                                      | 1,20   |
|                  | 4.                      | 68,5         | 65,0         | 3,5               | 9,8              | 41                      | 11,34                                      | 1,21   |
| УКУПНО           |                         |              |              | 30,0              | 78,1             | 328                     | 97,2                                       | 1,31   |

Просечна потрошња електричне енергије износила је 1,31 kWh·km<sup>-1</sup>. Посматрано по смеровима, просечна потрошња је износила 1,41 kWh·km<sup>-1</sup> у смеру "А" и 1,21 kWh·km<sup>-1</sup> у смеру "Б".

Мања потрошња енергије у смеру "Б" је последица веће рекулериције електричне енергије која се остварује при кочењу, на дужим деоницама трасе са негативним нагибима (деонице у паду) које су веома присутне у овом смеру кретања.

Недостатак методологије мерења преко SOC је што није могуће одредити потрошњу електричне енергије појединих система на возилу као што су: вучни мотори, компресор за ваздух, пумпа управљача, систем за грејање или хлађење путничког простора.

## 6.2 Поређење енергетске ефикасности Е-буса и дизел аутобуса

Резултати мерења потрошње енергије и енергетске ефикасности на градској линији бр. 41, аутобуса на електрични погон BYD E-12 (слика 6.4) поређени су са аутобусом са погоном на дизел гориво ИК-112N, слика 6.5.





Слика 6.4 Е-бус BYD E-12



Слика 6.5 Дизел аутобус ИК-112N

Основне техничке карактеристике наведених возила приказане су у табели 6.4 [137].

Табела 6.4 Техничке карактеристике тестираних возила

| Техничке карактеристике \ Тип возила | Е-бус BYD E-12            | Дизел аутобус ИК-112N      |
|--------------------------------------|---------------------------|----------------------------|
| Дужина, m                            | 12,000                    | 11,940                     |
| Маса празног возила, kg              | 14.300                    | 12.090                     |
| Погонски агрегат                     | 2 x Електромотор, Siemens | MAN D2066 LOH 201 (ЕУРО 4) |
| Максимална снага, kW                 | 2x90                      | 235                        |
| Макс. обртни момент, Nm              | 2x350                     | 1.100                      |
| Капацитет возила, путника            | 55                        | 105                        |

Потрошња електричне енергије Е-буса мери се у kWh, где је 1 kWh=3,6 MJ. Да би се могло вршити поређење енергетске ефикасности аутобуса са различитим погонским системима обзиром да користе различите врсте погонске енергије потребно је потрошену енергију исказати у MJ или kWh, на основу енергетски еквивалената како је приказано у табели 6.5 [18].

Табела 6.5 Количина енергије у појединим врстама горива

| Врста горива | Енергетска моћ, MJ       | Енергетска моћ, kWh          |
|--------------|--------------------------|------------------------------|
| Дизел        | 36 MJ·L <sup>-1</sup>    | 10 kWh·L <sup>-1</sup>       |
| КПП(биогаз)  | 33÷38 MJ·m <sup>-3</sup> | 9,1÷10,5 kWh·m <sup>-3</sup> |
| ТНГ          | 24 MJ·L <sup>-1</sup>    | 6,6 kWh·L <sup>-1</sup>      |
| Биодизел     | 33 MJ·L <sup>-1</sup>    | 9,1 kWh·L <sup>-1</sup>      |
| Водоник      | 11 MJ·m <sup>-3</sup>    | 3,05 kWh·m <sup>-3</sup>     |

Мерење потрошње дизел горива на аутобусу ИК-112N на линији бр. 41 обављено је 26.11.2014. године. Методологија мерења потрошње дизел горива заснивала се на коришћењу протокомера горива који је фабрички уграђен у аутобус ИК-112N г.б. број 501. Протокомер мери разлику количине дизел горива која је дистрибуирана из резервоара горива до система за убризгавање горива у мотор и количину горива која је преко повратног вода враћена у резервоар. Мерење количине потрошеног дизел горива вршено је за сваку возњу (полу-обрт) и за сваки смер кретања. Аутобус ИК-112N био је оптерећен са 40 путника, што репрезентује реалне услове експлоатације на линији бр. 41. Возило је стајало на свим станицама дуж трасе, чиме се симулирао реални возни циклус који је присутан на линији бр. 41. Систем за грејање у возилу био је искључен. Резултати мерења потрошње дизел горива приказани су у табели 6.6 [50,137].

Табела 6.6 Резултати мерења потрошње дизел горива за ИК-112N на линији бр. 41

| Редни број мерења              |                         | 1.    | 2.    | 3.    | 4.    | 5.    | 6.    | Просечна потрошња дизел горива |
|--------------------------------|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------------------|
| Смер                           |                         | "А"   | "Б"   | "А"   | "Б"   | "А"   | "Б"   | "А" + "Б"                      |
| Измерена потрошња дизел горива | L·(100km) <sup>-1</sup> | 51,2  | 46,2  | 49,1  | 45,9  | 50,2  | 46,4  | <b>48,2</b>                    |
|                                | MJ·km <sup>-1</sup>     | 18,43 | 16,63 | 17,67 | 16,52 | 18,00 | 16,70 | <b>17,35</b>                   |
|                                | kWh·km <sup>-1</sup>    | 5,11  | 4,61  | 4,90  | 4,58  | 5,00  | 4,63  | <b>4,82</b>                    |

Просечна потрошња дизел горива код аутобуса ИК-112N износила је 48,2 L·(100km)<sup>-1</sup>. Посматрано по смеровима у смеру "А" износила је 50,1 L·(100km)<sup>-1</sup>, а у смеру "Б" 46,1 L·(100km)<sup>-1</sup>. Мања потрошња дизел горива у смеру "Б" је последица мање потребне енергије за савлађивање отпора нагиба пута, с обзиром да је у смеру "Б" више заступљено кретање на низбрдици. Упоредни приказ добијених резултата мерења енергетске ефикасности Е-буса и дизел аутобуса на линији бр. 41 представљен је у табели 6.7.

Табела 6.7 Упоредни приказ резултата енергетске ефикасности возила са различитим погонским системима на линији бр. 41

| Погонски систем       | Просечна оптерећеност возила | Рекулпација % | Потрошња енергије* kWh·km <sup>-1</sup> |
|-----------------------|------------------------------|---------------|---|
| Дизел аутобус ИК-112N | 40%                          | 0             | <b>4,82</b>                             |
| Е-бус BYD Е-12        | 2.500 kg                     | 25÷30         | <b>1,31</b>                             |

\* Резултати потрошње енергије без коришћења система за грејање и хлађење путничког простора аутобуса

На линији бр. 41 енергетска ефикасност аутобуса на електрични погон BYD Е-12 већа је 3,67 пута у поређењу са аутобусом ИК-112N који користи дизел гориво. Добијени резултати мерења енергетске ефикасности потврђују *Хипотезу 2*, да аутобуси на електрични погон имају већу енергетску ефикасност у поређењу са аутобусима са погоном на дизел гориво изражену у потрошеној енергији по јединици пређеног пута (kWh·km<sup>-1</sup>).

### 6.3 Мерење потрошње електричне енергије код аутобуса на електрични погон са суперкондензаторима

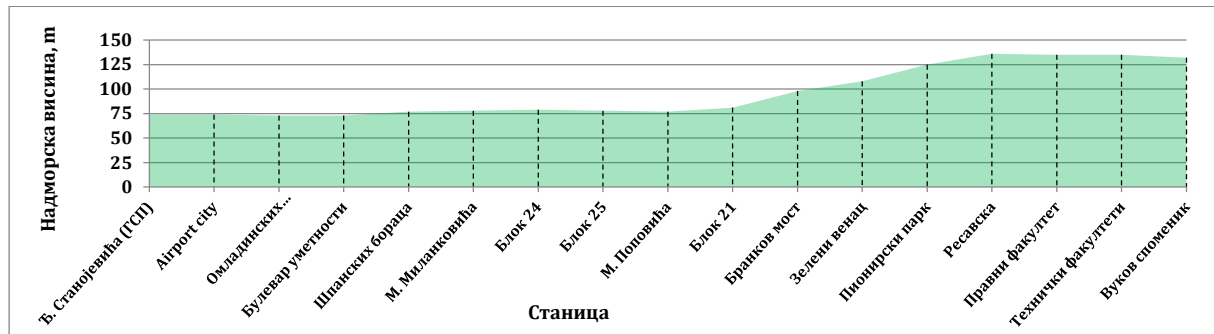
У Београду, прва линија јавног градског транспорта ЕКО 1 (Вуков споменик-Насеље Белвил) на којој раде искључиво аутобуси на потпуно електрични погон пуштена је у рад 1. септембра 2016. године. Градска линија ЕКО 1 представља нову линију која је наменски пројектована и прилагођена за рад аутобуса на потпуно електрични погон Higer KLQ6125GEV3, како би максимално дошле до изражаја енергетске и еколошке предности рада Е-буса у централном градском подручју Београда. Приказ техничких карактеристика аутобуса на електрични погон Higer KLQ6125GEV3 дат је у Прилогу 2.

Присуство аутобуса на електрични погон у редовном саобраћају омогућили су истраживања утицајних фактора на енергетске перформансе Е-буса Higer KLQ6125GEV у реалним условима рада, што је детаљно приказано у овом делу дисертације.

#### 6.4 Просторне и геометријске карактеристике линије ЕКО 1

Линија ЕКО 1 (Вуков споменик-Насеље Белвил) је дијаметрална градска линија која повезује стари део Београда са Новим Београдом.

Средња дужина линије ЕКО 1 је 7.995 m. Посматрано по смеровима, дужина трасе у смеру "А" је 7.477 m, где се налази 15 станица са просечним међустаничним растојањем од 534 m. У смеру "Б" дужина трасе је 8.513 m, где је позиционирано 17 станица са просечним међустаничним растојањем од 532 m. На слици 6.6 приказана је топографија терена са надморским висинама стајалишта.



Слика 6.6 Вертикална карактеристика трасе линији ЕКО 1

Геометријске карактеристике трасе линије ЕКО 1 карактерише равничарска конфигурација са малим нагибима терена пре свега на Новом Београду што трасу у смислу топографских карактеристика чини релативно лаком за савлађивање отпора пута приликом кретања возила. Већи нагиб трасе присутан је на деоници од Блока 21 до Ресавске улице. Траса линије са негативним нагибом (деонице пута са падом) је 61,8% дужине линије у смеру "А", са просечном вредности нагиба од -0,305% и максималном вредношћу нагиба деонице са падом на међустаничном растојању од -3,14%.

На линији ЕКО 1 у експлоатацији је 4 или 5 аутобуса Niger KLQ6125GEV3, зависно од актуелног реда вожње. Преглед динамичких елемената рада возила за радни дан приказан је у табели 6.8. [138].

Табела 6.8 Динамички елементи рада Е-буса на линије ЕКО 1

| Динамички елемент                         |         |         |
|---|---------|---------|
| Број Е-бус у раду                         | 4       | 5       |
| Време обрта, min                          | 90      | 90      |
| Интервал наиласка, min                    | 22,5    | 18      |
| Часовна фреквенција, Е-бус/час            | 2,7     | 3,3     |
| Капацитет возила, путника                 | 82      | 82      |
| Понуђени превозни капацитет, путника/час  | 219     | 273     |
| Дневно време рада Е-буса, h               | 16÷18   | 16÷18   |
| Дневни пређени број километара Е-буса, km | 190÷215 | 190÷215 |

Време пуњења Е-буса електричном енергијом на терминусима Вуков споменик и Белвил износи између 5 и 10 минута, зависно од степена испражњености суперкондензатора, што је директна последица експлоатационих услова рада на линији.

## 6.5 Карактеристике токова путника на линији ЕКО 1

Једна од најважнијих карактеристика сваке линије јавног градског транспорта су токови путника посматрано са аспекта протока путника као и других показатеља од којих су најважнији коефицијент измене путника, средња дужина путовања, итд.

Специфичност рада возила у јавном градском транспорту путника је да су она различито оптерећена путницима, с обзиром да су токови путника на линијама директно зависни од транспортних потреба становника за кретањем у току дана. Проток путника у возилу је утицајни фактор на потрошњу енергије за кретање возила, због чега је важно познавати карактеристике транспортних захтева на линији.

На линији ЕКО 1 аутобуси Niger KLQ6125GEV3 опремљени су Ирма Матрикс (Irma Matrix) сензорима за бројање улазака и излазака путника који су постављени на вратима возила. Анализа броја путника који се превозе аутобусима на електрични погон на линији ЕКО 1 спроведена је случајним избором радних дана у недељи, током периода од новембара 2017. године до фебруара 2018. године, што је приказано у табели 6.9.

Табела 6.9 Број превезених путника Е-бусом на линији ЕКО 1

| Датум<br>бројања | Радно време<br>hh:mm:ss | Е-бус<br>г.б. | Број превезених путника |          |        |
|------------------|-------------------------|---------------|-------------------------|----------|--------|
|                  |                         |               | смер "А"                | смер "Б" | укупно |
| 20.11.2017.      | 6:25:31 ÷ 22:29:37      | 2101          | 426                     | 570      | 996    |
| 23.11.2017.      | 5:55:22 ÷ 22:27:27      | 2101          | 505                     | 548      | 1053   |
| 11.12.2017.      | 5:55:18 ÷ 22:26:12      | 2101          | 473                     | 638      | 1111   |
| 24.1.2018.       | 5:50:36 ÷ 22:31:28      | 2101          | 444                     | 587      | 1031   |
| 24.1.2018.       | 5:21:51 ÷ 23:23:28      | 2102          | 536                     | 609      | 1145   |
| 30.1.2018.       | 5:23:51 ÷ 23:27:28      | 2102          | 541                     | 679      | 1220   |
| 1.2.2018.        | 5:22:38 ÷ 23:36:50      | 2102          | 475                     | 641      | 1116   |

За ниво детаљности процене броја превезених путника на линији ЕКО 1 истражени узорак има довољну тачност, с обзиром да није био циљ истраживање неравномерности транспортних захтева. Број превезених путника на линији ЕКО 1 посматрано по једном Е-бусу има приближно уједначену вредност. Може се усвојити да се број превезених путника по једном Е-бусу креће у границама од 996 до 1220 путника, односно усвојити просечан број превезених путника по једном Е-бусу око 1096 за радни дан.

Укупни број превезених путника Е-бусом г.б. 2101 који је реализован 24.1.2018. године је 1031 путника од чега је 444 путника превезено у смеру "А", а 587 путника у смеру "Б".

Специфичност рада возила за јавни градски транспорт у Београду, је да радно време возила обухвата шест карактеристичних периода (пресека) [139]. Расподела броја превезених путника посматрано по карактеристичним периодима рада на примеру Е-буса г.б. 2101 је приказано у табели 6.10.

Табела 6.10 Карактеристични периоди рада, Е-бус з.б 2101, линија ЕКО 1, 24.1.2018. године

| Карактеристични периоди рада Е-буса | Период у току дана hh:mm | Процентуална заступљеност у радном времену % | Укупни број превезених путника | Средњи број превезених путника на час |
|-------------------------------------|--------------------------|--|--------------------------------|---------------------------------------|
| Први поласци                        | 05:00÷6:00               | 5,5  | 43                             | 43                                    |
| Јутарње вршно оптерећење            | 06:00÷9:00               | 16,6   | 158                            | 52                                    |
| Међуоптерећење                      | 09:00÷13:00              | 22,2   | 189                            | 47                                    |
| Поподневно вршно оптерећење         | 13:00÷18:00              | 27,7   | 461                            | 92                                    |
| Вечерње оптерећење                  | 18:00÷22:00              | 22,2   | 153                            | 38                                    |
| Задњи поласци                       | 22:00 ÷ 23:00            | 5,5  | 27                             | 27                                    |

Специфичност токова путника на линији ЕКО 1 је да се највећи број путника превезе у поподневном вршном оптерећењу, значајно више у односу на јутарње вршно оптерећење. Број превезених путника у међувршном оптерећењу је нешто већи у односу на вечерње оптерећење, док најмањи број путника се превезе у раним јутарњим и касним вечерњим сатима.

Време превоза (путовања) Е-буса по смеру је збир времена проведеног у кретању, стајању на семафорима, стајањима услед застоја на траси кретања и стајањима на станицама:

$$T_p = T_{vk} + T_{vsf} + T_{vsz} + T_{vss} = T_v + T_{vss}, \quad (6.11)$$

где је:

$T_p$  - време превоза (путовања) Е-буса по смеру, min,

$T_{vk}$  - укупно време Е-буса у кретању по смеру, min,

$T_{vsf}$  - укупно време стајања Е-буса на семафорима по смеру, min,

$T_{vsz}$  - укупно време стајања Е-буса услед застоја, min,

$T_{vss}$  - укупно време стајања Е-буса на станицама по смеру, min,

$T_v$  - укупно време вожње Е-буса по смеру, min.

Збир времена кретања Е-буса, стајања на семафорима и стајањима услед застоја представља време вожње ( $T_v$ ).

Превозна брзина посматрана по смеру кретања представља однос дужине линије датог смера и времена превоза. Посматрано за смер "А" превозна брзина је:

$$v_{pA} = \frac{60 \cdot L_A}{T_{vA}}, \quad (6.12)$$

где је:

$v_{pA}$  - превозна брзина у смеру "А", km·h<sup>-1</sup>,

$T_{vA}$  - време превоза Е-буса у смеру "А", min,

$L_A$  - дужина линије у смеру "А", km.

односно, за смер "Б"

$$v_{pB} = \frac{60 \cdot L_B}{T_{vB}}, \quad (6.13)$$

где је:

$v_{pB}$  - превозна брзина у смеру "Б", km·h<sup>-1</sup>,

$T_{pB}$  - време превоза Е-буса у смеру "Б", min,

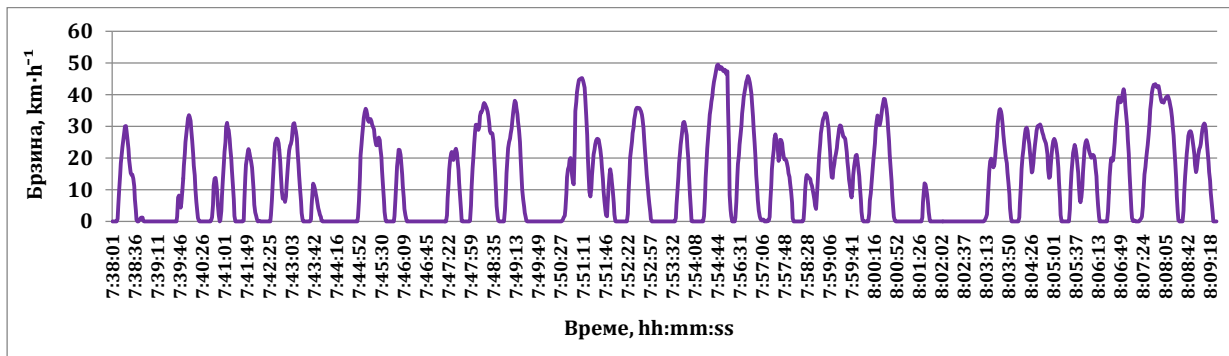
$L_B$  - дужина линије у смеру "Б", km.

## 6.6 Карактеристике возног циклуса и саобраћајних услова на линији ЕКО1

Траса линије ЕКО 1 пролази кроз централну градску зону где је највећи број улица са којима се траса линије укршта опремљен семафорима, што битно утиче на возни циклус возила који се реализује на међустаничним растојањима. У смеру "А" постоји 27 сигналисаних раскрсница, а у смеру "Б" 28 сигналисаних раскрсница.

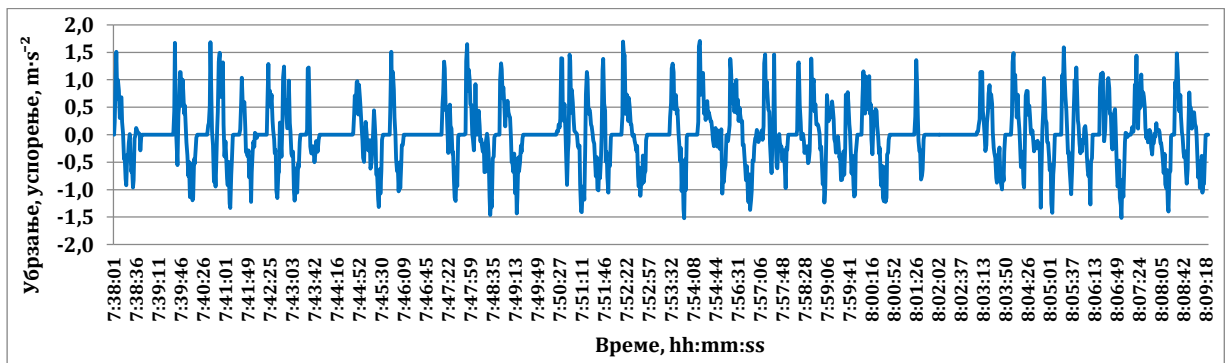
Саобраћајнице карактеришу интензивни токови путничких аутомобила и аутобуса, посебно у јутарњем и поподневном шпицу, што има утицаја на појаву застоја и режима рада "стани-крени".

Пример возног циклуса на линији ЕКО 1 и остварених брзина кретања Е-буса који су преузети преко S-CAN мреже 28.06.2018. године (Е-бус г.б 2104) у периоду од 7:38:01 до 8:09:30 у смеру "А" приказани су на слици 6.7.



Слика 6.7 Возни циклус на линији ЕКО 1, смер "А", у периоду 7:38:01 до 8:09:30, Е-бус 2104, 28.06.2018. године

За снимљени возни циклус остварена убрзања и успорења Е-буса у смеру "А" приказани су на слици 6.8.



Слика 6.8 Убрзања и успорења Е-буса на линији ЕКО 1, смер "А", у периоду 7:38:01 до 8:09:30, Е-бус 2104, 28.06.2018. године

Аутобуси на електрични погон имају боље карактеристике убрзања у поређењу са аутобусима који имају погонске моторе СУС (дизел или гасне) с обзиром да електромотори највећи обртни момент постижу при малим бројевима обртаја што

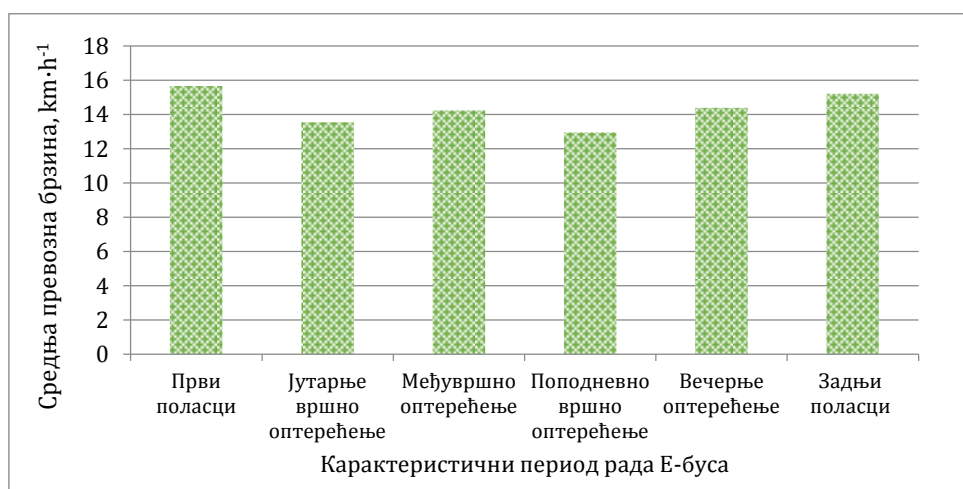
доводи до бољег убрзања возила [77,91]. Расподела остварених убрзања и успорења који су реализовани у смеру "А" у наведеном временском периоду приказани су на слици 6.9.



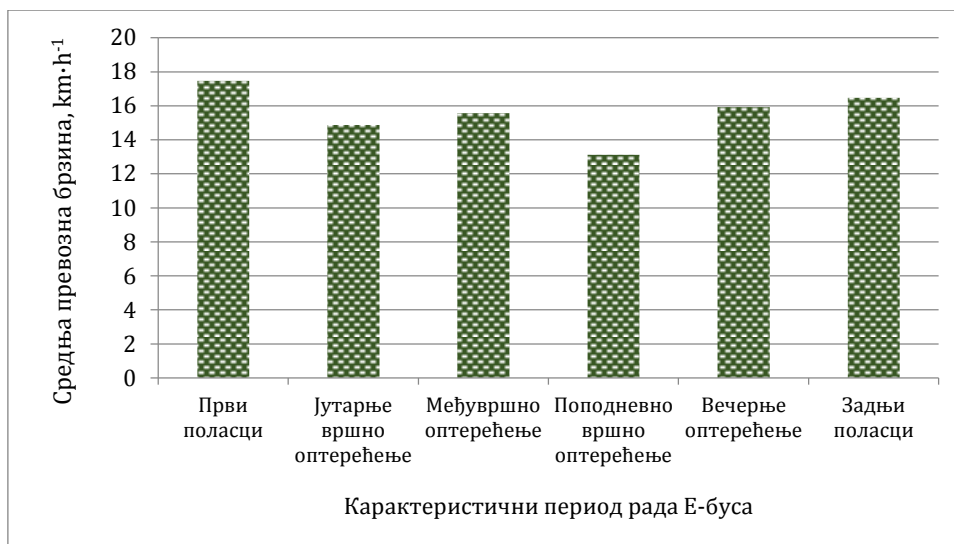
Слика 6.9 Расподела остварених убрзања и успорења на линији ЕКО 1, смер "А" у периоду 7:38:01 до 8:09:30, Е-бус 2104, 28.06.2018. године

У смеру "А" у периоду од 7:38:01 до 8:09:30 Е-бус је остварио 895 циклуса убрзања и успорења. Максимална регистрована вредност убрзања износила је  $1,70 m \cdot s^{-2}$ , док је максимално успорење измерено  $1,52 m \cdot s^{-2}$ . Просечна вредност убрзања коју остварује Е-бус у опсегу од 0,1 до  $1,4 m \cdot s^{-2}$  је  $0,59 m \cdot s^{-2}$ . У фази успорења, просечно успорење је око  $0,58 m \cdot s^{-2}$  за вредности успорења од 0,2 до  $1,2 m \cdot s^{-2}$ .

Превозне брзине по смеровима кретања Е-буса имају током дана различите вредности и директно су у вези са карактеристичним периодима рада Е-буса током дана (вршно оптерећење, међуоптерећење, први поласци, задњи поласци). Варијације средњих превозних брзина за различите карактеристичне периоде у току дана Е-буса које су остварене током пролећно-јесењег периода на линији ЕКО 1, приказано је на сликама 6.10 и 6.11 [140].



Слика 6.10 Средња превозна брзина за различите карактеристичне периоде рада Е-бус, пролећно-јесењи период, смер "А"



Слика 6.11 Средња превозна брзина за различите карактеристичне периодима рада Е-бус, пролећно-јесењи период, смер "Б"

У току јутарњег и поподневног вршног оптерећења, превозне брзине имају најмање вредности док се највеће превозне брзине остварују се у раним јутарњим (први поласци) и касним вечерњим сатима (задњи поласци).

### 6.7 Карактеристике климатских услова рада Е-буса у Београду

Београд има умерену континенталну климу. Просечна температура на годишњем нивоу је  $12,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Најтоплији месец је јул, са просечном температуром од  $21,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а најхладнији јануар са просечном температуром од  $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ . У Београду је око 25 дана у години са температуром већом од  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  [141].

Са становишта термичког комфора за све типове возила која се користе у јавном превозу идеални дијапазон температуре унутар путничког простора је између  $18\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $22\text{ }^{\circ}\text{C}$  [142]. Код аутобуса на електрични погон Nigez KLQ6125GEV3 систем за хлађење и грејање путничког и возачевог простора је на електрични погон. Подручје спољне температуре у опсегу  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+12\text{ }^{\circ}\text{C}$ , подразумева коришћење система за грејање.

При спољним температурама  $+12\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+22\text{ }^{\circ}\text{C}$ , вентилацијом ваздуха обезбеђују се задати микроуслови путничког простора. Вентилација може бити остварена "природним" струјањем кроз бочне прозоре или кровне отворе и коришћењем вентилатора који је погоњен електромотором. У случајевима коришћења вентилатора присутан је и додатни захтев за потрошњом електричне енергије из система за складиштење електричне енергије.

При спољним температурама које су веће од  $+23\text{ }^{\circ}\text{C}$ , користи се систем за хлађење. Рад система за грејање и хлађење и утицај на потрошњу електричне енергије може се повезати са спољном температуром, зависно од периода године тј. да ли се ради о зимском, летњем или пролећно-јесењем периоду.

У условима експлоатације у Београду ове периоде можемо посматрати по месецима што је представљено у табели 6.11.



Табела 6.11 Типични сезонски периоди експлоатације Е-буса у Београду

| Месец / период             | Зимски | Летњи | Пролећно-јесењи |
|----------------------------|--------|-------|-----------------|
| Јануар                     | X      |       |                 |
| Фебруар                    | X      |       |                 |
| Март                       | X      |       |                 |
| Април                      | X      |       | X               |
| Мај (прва половина)        |        |       | X               |
| Мај (друга половина)       |        | X     | X               |
| Јун                        |        | X     |                 |
| Јул                        |        | X     |                 |
| Август                     |        | X     |                 |
| Септембар (прва половина)  |        | X     |                 |
| Септембар (друга половина) |        |       | X               |
| Октобар (прва половина)    |        |       | X               |
| Октобар (друга половина)   | X      |       | X               |
| Новембар                   | X      |       |                 |
| Децембар                   | X      |       |                 |

## 6.8 Анализа потрошње електричне енергије Е-буса

Прикупљање података о оствареним потрошњама електричне енергије Е-буса Níger KLQ6125GEV3 на линији ЕКО 1 је спроведено у периоду 2016.-2019. године на основу чега је урађена статистичка обрада и анализа остварених резултата.

Методологија мерења потрошње електричне енергије Е-буса заснована је на прикупљању података промене степена напуњености суперкондензатора (SOC) на почетку, односно крају вожње, посебно за сваки смер кретања возила. Промена напуњености SOC изражена у процентима, време почетка и завршетка вожње преузети су преко BMS система коришћењем апликације "E-bus data Visualizer".

На основу регистроване промене SOC за сваку вожњу у смеру "А" и смеру "Б" израчуната је потрошена електрична енергија помоћу једначина 6.9 и 6.10 исказана у kWh·km<sup>-1</sup>. На основу регистрованог времена поласка и завршетка вожње за сваки смер, израчуната су времена превоза и превозне брзине помоћу једначина 6.12 и 6.13.

Мерење потрошње електричне енергије Е-буса обухватио је пролећно-јесењи, летњи и зимски период експлоатације, чиме су обухваћене спољне температуре у дијапазону од -12 °C до +38 °C. Мерење потрошње електричне енергије у пролећно-јесењем периоду вршено је у данима када су спољне температуре биле у дијапазону од +12 °C до +22 °C, како би се искључио утицај рада система за грејање и хлађење унутрашњости возила с обзиром да при наведеним спољним температурама најмања је вероватноћа коришћења ова два система.

У летњем периоду анализиране су потрошње електричне енергије у опсегу спољних температура од +22 °C до +38 °C, док је у зимском периоду обухваћен узорак потрошње електричне енергије у дијапазону -12 °C до +12 °C. Величина узорка који је предмет истраживања је 2.347 мерења. Приказ величине истраживаног узорка по сезонским периодима експлоатације приказан је у табели 6.12 [140].

Табела 6.12 Приказ узорка истраживања потрошње Е-буса

| Период          | Смер "А"    | Смер "Б"    | Смер "А" + Смер "Б" |
|-----------------|-------------|-------------|---------------------|
| Пролећно-јесењи | 357         | 347         | 704                 |
| Летњи           | 401         | 453         | 854                 |
| Зимски          | 397         | 392         | 789                 |
| <b>Укупно</b>   | <b>1155</b> | <b>1192</b> | <b>2347</b>         |

Резултати мерења потрошње електричне енергије Е-буса односе се на радне дане у току недеље. Узорком нису обухваћени резултати мерења промене напуњености SOC који су били последица очигледних поремећаја у раду Е-буса на линији изазваних најчешће дугим застојима услед саобраћајних незгода, искључења возила због квара, скраћењем вожње услед измене режима одвијања саобраћаја и слично.

Као критеријум узето је да максимално време превоза у једном смеру до 52 минута.

За обраду података коришћене су статистичке методе [143]:

- Карактеристике емпиријске расподеле (фреквенција узорка, аритметичка средина, стандардно одступање, дисперзија);
- Теорија оцена узорка (интервал поузданости за средњу вредност основне нормалне популације);
- Верификација статистичких хипотеза (Chi-квадрат тест за верификацију не параметарске хипотезе, тестирање једнакости средњих вредности два основна скупа на основу њихових узорка);
- Теорија корелације (линерана зависност, степена функција, коефицијент корелације).

На основу репрезентативних узорка потрошње електричне енергије Е-буса,  $X_{i_A}$  за смер "А" и  $X_{i_B}$  за смер "Б" извршена је статистичка анализа резултата потрошње електричне енергије Е-буса, коришћењем средње вредности  $X_s$  и стандардног одступања  $s_d$  [143].

$$X_s = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n}{n}, \quad (6.14)$$

$$s_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_s)^2}{n}}, \quad (6.15)$$

где је:

$X_s$  – средња (просечна) вредност статистичког скупа,

$X_1, X_2, \dots, X_n$  – појединачна вредност узорка,

$s_d$  – стандардно одступање,

$n$  – величина узорка (статистичког скупа).

Расподела узорка потрошње електричне енергије код Е-буса тежи претпостављеној нормалној (Gaus) расподели, што се доказује употребом Хи-квадрат теста.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^r \frac{(f_{ei} - f_{ti})^2}{f_{ti}}, \quad (6.16)$$

где је:

$\chi^2$  – вредност теста "Хи-квадрат",  
 $f_{ei}$  – емпиријска фреквенција  $i$ -те класе,  
 $f_{ti}$  – теоријска фреквенција  $i$ -те класе,  
 $r$  – број класа.

Ако је израчуната вредност  $\chi^2$  мања од табличне вредности  $\chi_{\alpha}^{2(k)}$ , где вероватноћа  $\alpha$  представља критични коефицијент хипотезе слагања теоријске и емпиријске расподеле, прихвата се хипотеза да емпиријска расподела тежи теоријској расподели.

Најчешће се за критични коефицијент узимају вредности 0,05 или 0,01. Број степени слободе за нормалну (Гаусову) расподелу рачуна се као  $k=r-3$ . Ако су теоријске фреквенције  $f_{ti}$  мање од 5, што је чест случај у почетним и крајњим класама, тада се те класе сједињују са суседним [143].

Код нормалне расподеле непрекидна случајна променљива  $X$  са параметрима  $\mu$  и  $\sigma$ , што се означава као  $X \sim N(\mu, \sigma)$ , има густину расподеле вероватноћа као:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}, \quad -\infty < x < \infty. \quad (6.17)$$

Вероватноћа да нека случајно променљива  $X \sim N(\mu, \sigma)$  има вредност на датом интервалу  $(a, b)$  једнака је:

$$P(a < X < b) = P\left(\frac{a-\mu}{\sigma} < \frac{X-\mu}{\sigma} < \frac{b-\mu}{\sigma}\right) = P(t_1 < T < t_2) = \Phi(t_2) - \Phi(t_1), \quad (6.18)$$

где је:

$\Phi(t_1), \Phi(t_2)$  – Лапласове функције за стандардизоване случајне променљиве  $t_1, t_2$  за  $N(0, 1)$ .

С обзиром да расподела узорка одговара нормалној расподели, очекивани интервал потрошње електричне енергије Е-буса на основу интервалне процене средње вредности ( $\mu$ ) основног скупа са вероватноћом од 95 %, за узорак  $n \geq 30$ , представљен је следећом једначином [143].

$$P\left(X_s - 1,96 \frac{S_n}{\sqrt{n}} < \mu < X_s + 1,96 \frac{S_n}{\sqrt{n}}\right) = 0,95. \quad (6.19)$$

Да ли разлике у потрошњи електричне енергије у карактеристичним периодима имају случајни карактер, испитано је коришћењем теста једнакости средњих вредности два основна скупа помоћу њихових узорака.

Нека су  $X_1$  и  $X_2$  аритметичке средине из два велика узорка величине  $n_1$  и  $n_2$  који имају нормалну расподелу  $N(\mu_1, \sigma_1)$  и  $N(\mu_2, \sigma_2)$  [143]. Стандардизована случајна променљива има облик:

$$t = \frac{X_1 - X_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}, \quad (6.20)$$

и има нормалну расподелу  $N(0,1)$  тако да је  $|t| > 1,96 = t_{0,05}$ .

Ако је  $|t| > t_{0,05} = 1,96$ , сматраће се да је разлика средњих вредности значајна.

Ако је  $|t| < t_{0,05} = 1,96$ , сматраће се да је разлика средњих вредности занемарива.

У случају малог узорка где је  $n_1 < 30$  и  $n_2 < 30$  и припадају скуповима који имају нормалну расподелу случајна променљива има облик:

$$t = \frac{X_1 - X_2}{\sqrt{\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \cdot \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)}}, \quad (6.21)$$

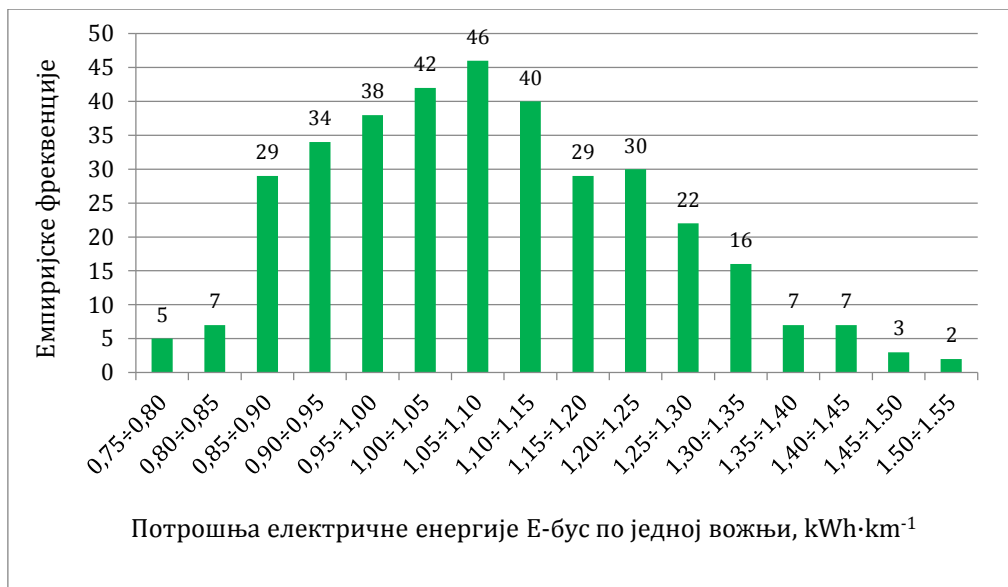
и има Студентову расподелу са  $k = n_1 + n_2 - 2$  степени слободе. Када је  $n_1 + n_2 - 2 > 30$  Студентова расподела тежи нормалној, тако да  $t_{0,05}^k$  има вредност 1,96 [143].

### 6.8.1 Анализа потрошње електричне енергије Е-буса на линији ЕКО 1 у пролећно-јесењем периоду

#### Смер "А" (Вуков споменик- Насеље Белвил), пролећно-јесењи период

У смеру "А" (Вуков споменик-Насеље Белвил) анализиран је узорак од 357 мерења и добијена је просечна вредност потрошње електричне енергије Е-буса  $1,087 \text{ kWh} \cdot \text{km}^{-1}$  и стандардно одступање  $0,153 \text{ kWh} \cdot \text{km}^{-1}$  [140].

Емпиријска расподела анализираниог узорка од 357 мерења по класама потрошње електричне енергије приказана је на слици 6.12.



Слика 6.12 Емпиријска расподела потрошње електричне енергије Е-буса, смер "А", пролећно-јесењи период

За приказану емпиријску расподелу (слика 6.12) вредност  $\chi^2 = 18,247$ , што је мања вредност од табличне вредности  $\chi_{0,05}^{2(11)} = 19,657$ , чиме је доказана хипотеза да потрошње електричне енергије код Е-буса тежи нормалној (Gaus) расподели.

У пролећно-јесењем периоду просечна вредност потрошње електричне енергије аутобуса на електрични погон, с обзиром да је  $P(1,071 < \mu < 1,102) = 0,95$ , налази се у интервалу између 1,071 и 1,102 kWh·km<sup>-1</sup>,

На основу снимљеног узорка од 357 мерења превозне брзине која су возила остварила у смеру "А", добијена је средња превозна брзина 13,99 km·h<sup>-1</sup> са стандардним одступањем од 1,74 km·h<sup>-1</sup>.

Остварене просечне потрошње електричне енергије Е-буса и остварене средње превозне брзине током карактеристичних периода рада у пролећно-јесењем периоду приказане су у табели 6.13.

Табела 6.13 Просечна потрошња електричне енергије и средња превозна брзина Е-буса, смер "А", пролећно-јесењи период

| Карактеристични период рада | Величина узорка | Просечна потрошња електр.енергије kWh·km <sup>-1</sup> | Стандардно одступање kWh·km <sup>-1</sup> | Средња превозна брзина km·h <sup>-1</sup> | Стандардно одступање km·h <sup>-1</sup> |
|-----------------------------|-----------------|--|---|---|---|
| Први поласци                | 24              | 0,943  | 0,145                                     | 15,66                                     | 1,59                                    |
| Јутарње вршно оптерећење    | 64              | 1,112  | 0,139                                     | 13,56                                     | 1,73                                    |
| Међувршно оптерећење        | 81              | 1,043  | 0,127                                     | 14,24                                     | 1,36                                    |
| Поподневно вршно оптерећење | 91              | 1,209  | 0,116                                     | 12,96                                     | 1,64                                    |
| Вечерње оптерећење          | 71              | 1,049  | 0,139                                     | 14,39                                     | 1,46                                    |
| Задњи поласци               | 26              | 0,977  | 0,130                                     | 15,22                                     | 1,47                                    |
| <b>Укупно</b>               | <b>357</b>      | <b>1,087</b>   | <b>0,153</b>                              | <b>13,99</b>                              | <b>1,74</b>                             |

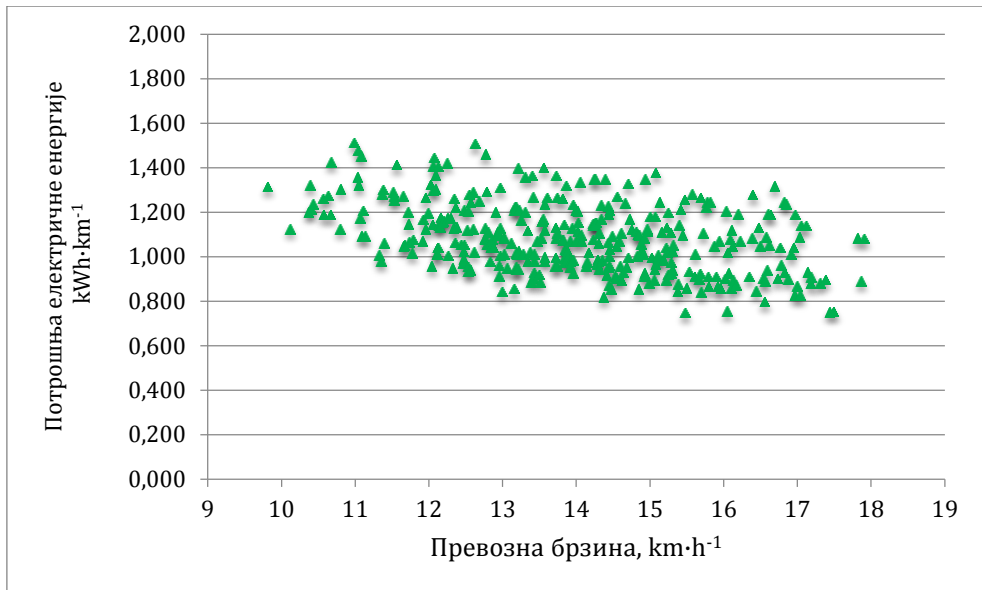
Просечна потрошња електричне енергије Е-буса различита је за сваки карактеристични период рада и потврђује део полазне *Хипотезе 3* да потрошња електричне енергије Е-буса зависи од периода рада Е-буса на линији.

На основу урађеног теста једнакости средњих вредности потрошње електричне енергије Е-буса за све карактеристичне периоде, за вредности случајне променљиве  $|t| > 1,96$  доказана је значајна статистичка разлика просечне потрошње електричне енергије изражене у kWh·km<sup>-1</sup>.

Разлика просечне потрошње електричне енергије је доказана у свим поређењима карактеристичних периода рада Е-буса, осим у случају поређења просечне потрошње електричне енергије која је остварена у периоду првих полазака и задњих  $|t| = 0,870 < 1,96$ , као и у случају поређења међувршног оптерећења и вечерњег оптерећења  $|t| = 0,276 < 1,96$ .

У ова два карактеристична периода број превезених путника је приближно исти као и саобраћајни услови, па је за очекивати да нема статистичког значаја у оствареној просечној потрошњи електричне енергије по пређеном километру.

Потрошње електричне енергије Е-буса и превозне брзине које су остварене у смеру "А" приказане су на слици 6.13.



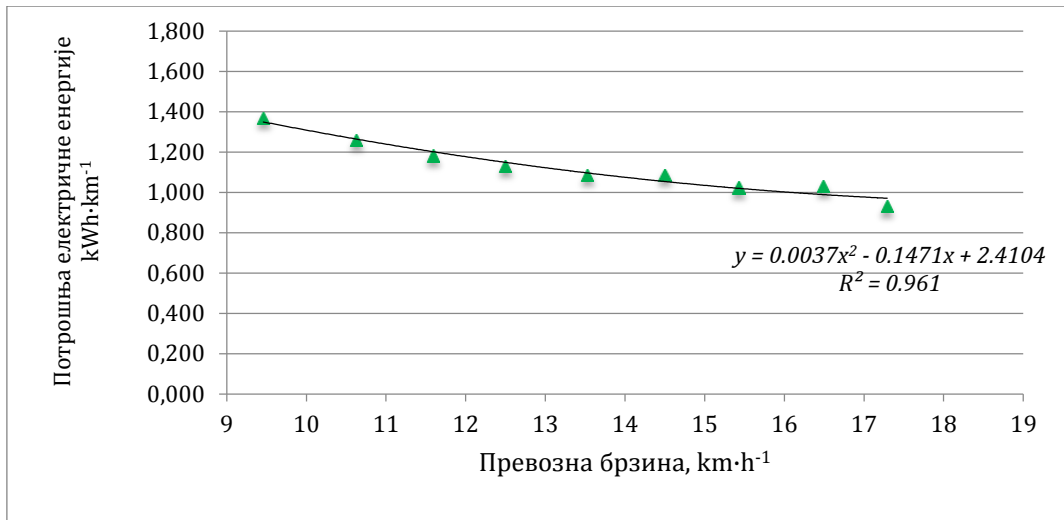
Слика 6.13 Потрошње електричне енергије и превозне брзине, смер "А", пролећно-јесењи период

Обрадом узорка од 357 мерења остварене потрошње електричне енергије Е-буса изражене у  $\text{kWh}\cdot\text{km}^{-1}$  и остварених превозних брзина исказаних у  $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ , приказано је у табели 6.14.

Табела 6.14 Просечна потрошња електричне енергије и превозне брзине Е-буса, смер "А", пролећно-јесењи период

| Интервал превозне брзине $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ | Фреквенције | Просечна потрошња у интервалу $\text{kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ |
|--|-------------|---|
| 9,0 ÷ 10,0   | 1           | 1,368   |
| 10,0 ÷ 11,0  | 13          | 1,259   |
| 11,0 ÷ 12,0  | 30          | 1,182   |
| 12,0 ÷ 13,0  | 66          | 1,130   |
| 13,0 ÷ 14,0  | 71          | 1,086   |
| 14,0 ÷ 15,0  | 71          | 1,086   |
| 15,0 ÷ 16,0  | 51          | 1,022   |
| 16,0 ÷ 17,0  | 39          | 1,029   |
| 17,0 ÷ 18,0  | 15          | 0,931   |
| <b>Укупно</b>  | <b>357</b>  |   |

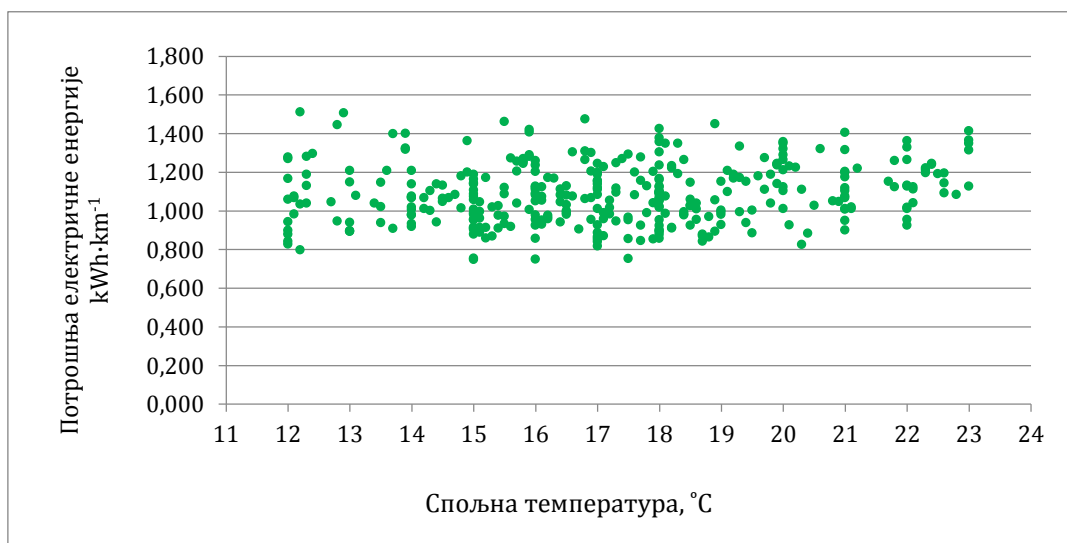
Корелативна зависност ове две величине је приказано на слици 6.14. Зависност потрошње електричне енергије Е-буса изражене у  $\text{kWh}\cdot\text{km}^{-1}$  и превозних брзина изражених у  $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ , које су остварене у пролећно-јесењем периоду рада за смер "А", описује се степеном функцијом другог реда  $y = 0,0037x^2 - 0,1471x + 2,4104$  и коефицијентом корелације  $R^2=0,961$ .



Слика 6.14 Зависност потрошње електричне енергије и превозне брзине Е-буса, смер "А", пролећно-јесењи период

Добијена корелативна веза потврђује изузетно добро слагање криве са резултатима мерења и потврђује део полазне *Хипотезе 3* да потрошња електричне енергије Е-буса зависи од превозне брзине.

У посматраном периоду истраживања на узорку од 357 мерења анализирана је потрошња електричне енергије Е-буса у зависности од спољне температуре [144], која је регистрована током рада Е-буса. Приликом избора дана када су рађена мерења спољне температуре биле су у опсегу од +12 °С до +23 °С. Пошло се од претпоставке да је у наведеном температурном подручју најмања вероватноћа коришћења система за грејање или хлађење у возилу, како би утицај на потрошњу електричне енергије Е-буса ових фактора био смањен на најмању меру, односно главни утицај на потрошњу било оптерећење возила и саобраћајна брзина, односно карактеристични период рада возила. Зависност потрошње електричне енергије Е-буса и спољне температуре која је измерена у смеру "А" приказана је на слици 6.15.



Слика 6.15 Зависност потрошње електричне енергије Е-буса и спољне температуре, смер "А", пролећно-јесењи период

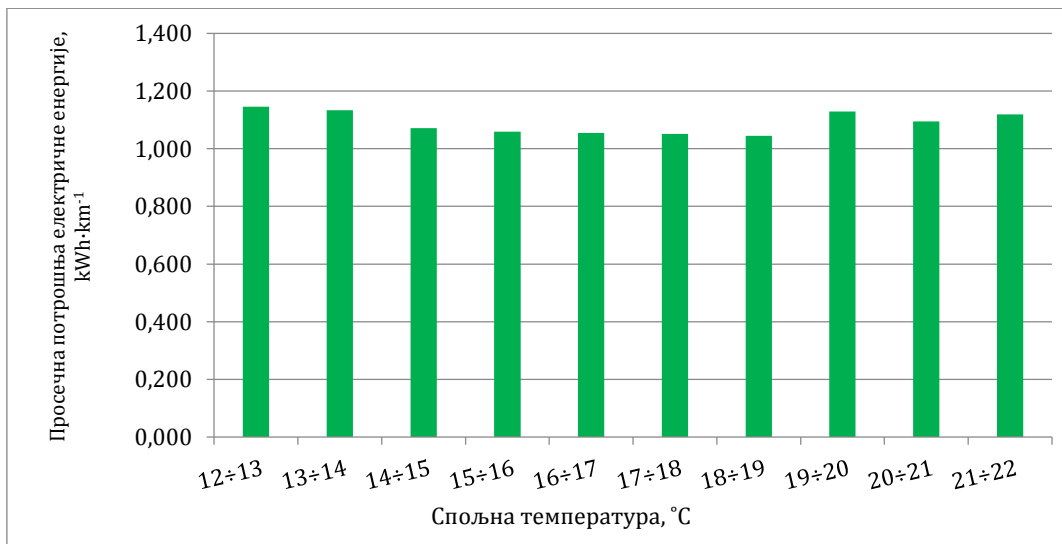
Обрадом узорка од 357 мерења остварене потрошње електричне енергије Е-буса изражене у kWh·km<sup>-1</sup>, остварених при различитим спољним температурама је приказано у табели 6.15 и слици 6.16.

Табела 6.15 Просечна потрошња електричне енергије Е-буса, за различите спољне температуре, смер "А", пролећно-јесењи период

| Интервал спољне температуре °C | Фреквенције | Просечна потрошња у интервалу kWh·km <sup>-1</sup> |
|--------------------------------|-------------|--|
| 12,0÷13,0                      | 24          | 1,105  |
| 13,0÷14,0                      | 17          | 1,104  |
| 14,0÷15,0                      | 26          | 1,070  |
| 15,0÷16,0                      | 53          | 1,057  |
| 16,0÷17,0                      | 46          | 1,074  |
| 17,0÷18,0                      | 44          | 1,043  |
| 18,0÷19,0                      | 57          | 1,068  |
| 19,0÷20,0                      | 25          | 1,119  |
| 20,0÷21,0                      | 19          | 1,141  |
| 21,0÷22,0                      | 19          | 1,122  |
| 22,0÷23,0                      | 27          | 1,171  |
| <b>Укупно</b>                  | <b>357</b>  |  |

Из табеле 6.15 и слике 6.16 закључује се да просечне потрошње електричне енергије Е-буса имају мала одступања у посматраним температурним опсезима. У температурном опсегу од +14 °C до +19 °C разлика у оствареној просечној потрошњи је минимална.

При спољним температурама од +12 °C до +14 °C забележена је већа просечна потрошња електричне енергије Е-буса, што је очекивано као последица коришћења система за грејање путничког простора у јутарњим часовима рада возила.



Слика 6.16 Расподела просечне потрошње електричне енергије Е-буса у зависности од спољне температуре, смер "А", пролећно-јесењи период



При спољним температурама од  $+19\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+23\text{ }^{\circ}\text{C}$ , где је коришћен систем за хлађење присутно је повећање просечне потрошње електричне енергије возила, најчешће у периоду поподневног вршног оптерећења када је број путника у возилу највећи и када спољне температуре достижу свој максимум.

### Смер "Б" (Насеље Белвил-Вуков споменик), пролећно-јесењи период

У смеру "Б" (Насеље Белвил-Вуков споменик) анализиран је узорак од 347 мерења и добијена је просечна вредност потрошње електричне енергије Е-буса од  $1,386\text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$  и стандардно одступање  $0,143\text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ [140]. Расподела анализираних узорка од 347 мерења по класама потрошње електричне енергије приказана је на слици 6.17.



Слика 6.17 Емперијска расподела потрошње електричне енергије Е-буса смер "Б", пролећно-јесењи период

Потрошња електричне енергије Е-буса у смеру "Б" је сагласна са нормалном расподелом, што је проверено  $\chi^2$ -тестом. ( $\chi^2 = 18,247$ , што је мања вредност од табличне вредности  $\chi_{0,05}^{2(10)} = 18,307$ ). Расподела узорка одговара нормалној расподели.

Очекивани интервал просечне потрошње електричне енергије Е-буса на основу интервалне процене средње вредности ( $\mu$ ) основног скупа са вероватноћом поузданости од 95 %, за узорак  $n \geq 30$ , налази се у интервалу између 1,373 и  $1,403\text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ .

На основу снимљеног узорка од 347 мерења превозне брзине која су возила остварила у смеру "Б" добијена је средња превозна брзина  $14,81\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  са стандардним одступањем од  $1,92\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ .

Преглед остварене просечне потрошње електричне енергије Е-буса и остварене средње превозне брзине током карактеристичних периода рада у пролећно-јесењем периоду приказан је у табели 6.16.

Табела 6.16 Просечна потрошња електричне енергије и средња превозна брзина Е-буса, смер "Б", пролећно-јесењи период

| Карактеристични период рада | Величина узорка | Просечна потрошња електр.енергије kWh·km <sup>-1</sup> | Стандардно одступање kWh·km <sup>-1</sup> | Средња превозна брзина km·h <sup>-1</sup> | Стандардно одступање km·h <sup>-1</sup> |
|-----------------------------|-----------------|--|---|---|---|
| Први поласци                | 22              | 1,212  | 0,094                                     | 17,46                                     | 1,34                                    |
| Јутарње вршно оптерећење    | 71              | 1,393  | 0,099                                     | 14,87                                     | 1,54                                    |
| Међувршно оптерећење        | 82              | 1,354  | 0,125                                     | 15,57                                     | 1,30                                    |
| Поподневно вршно оптерећење | 86              | 1,523  | 0,120                                     | 13,12                                     | 1,54                                    |
| Вечерње оптерећење          | 72              | 1,337  | 0,100                                     | 15,93                                     | 1,54                                    |
| Задњи поласци               | 14              | 1,223  | 0,068                                     | 16,46                                     | 1,47                                    |
| <b>Укупно</b>               | <b>347</b>      | <b>1,386</b>   | <b>0,143</b>                              | <b>14,81</b>                              | <b>1,92</b>                             |

Просечна потрошња електричне енергије Е-буса различита је за сваки карактеристични период и потврђује део полазне *Хипотезе 3* да потрошња електричне енергије зависи од карактеристичног периода рада Е-буса на линији.

На основу урађеног теста једнакости средњих вредности, доказана је значајна разлика просечне потрошње електричне енергије изражене у kWh·km<sup>-1</sup> у свим поређењима између карактеристичних периода рада Е-буса, осим у случају поређења просечне потрошње која је остварена у периоду првих полазака и задњих где је  $|t|=0,409 < 1,96$ , и случају поређења међувршног оптерећења и вечерњег оптерећења  $|t|=0,926 < 1,96$ .

Потрошња електричне енергије Е-буса и превозне брзине које су остварене у смеру "Б", приказана је на слици 6.18.



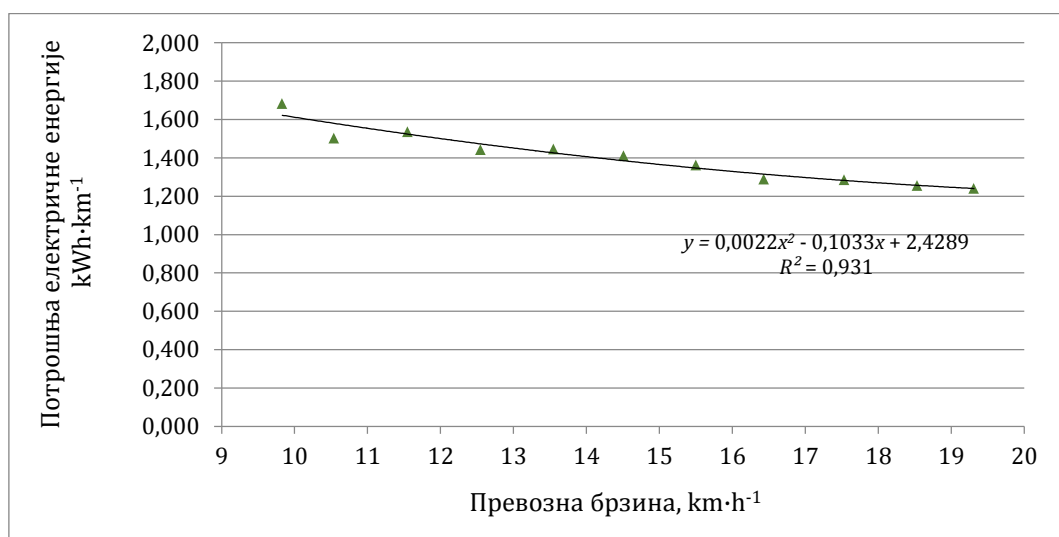
Слика 6.18 Потрошње електричне енергије и превозне брзине, смер "Б", пролећно-јесењи период

Обрадом узорка од 347 мерења остварене потрошње електричне енергије Е-буса изражене у  $\text{kWh}\cdot\text{km}^{-1}$  и остварених превозних брзина исказаних у  $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$  у смеру "Б", добијене су вредности приказане у табели 6.17.

Табела 6.17 Просечна потрошња електричне енергије Е-буса и превозне брзине, смер "Б", пролећно-јесењи период

| Интервал превозне брзине $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ | Фреквенција | Просечна потрошња у интервалу $\text{kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ |
|--|-------------|---|
| 9,0 ÷ 10,0   | 1           | 1,682   |
| 10,0 ÷ 11,0  | 5           | 1,502   |
| 11,0 ÷ 12,0  | 17          | 1,536   |
| 12,0 ÷ 13,0  | 39          | 1,443   |
| 13,0 ÷ 14,0  | 53          | 1,446   |
| 14,0 ÷ 15,0  | 80          | 1,411   |
| 15,0 ÷ 16,0  | 64          | 1,362   |
| 16,0 ÷ 17,0  | 44          | 1,289   |
| 17,0 ÷ 18,0  | 25          | 1,286   |
| 18,0 ÷ 19,0  | 11          | 1,255   |
| 19,0 ÷ 20,0  | 8           | 1,240   |
| <b>Укупно</b>  | <b>347</b>  |   |

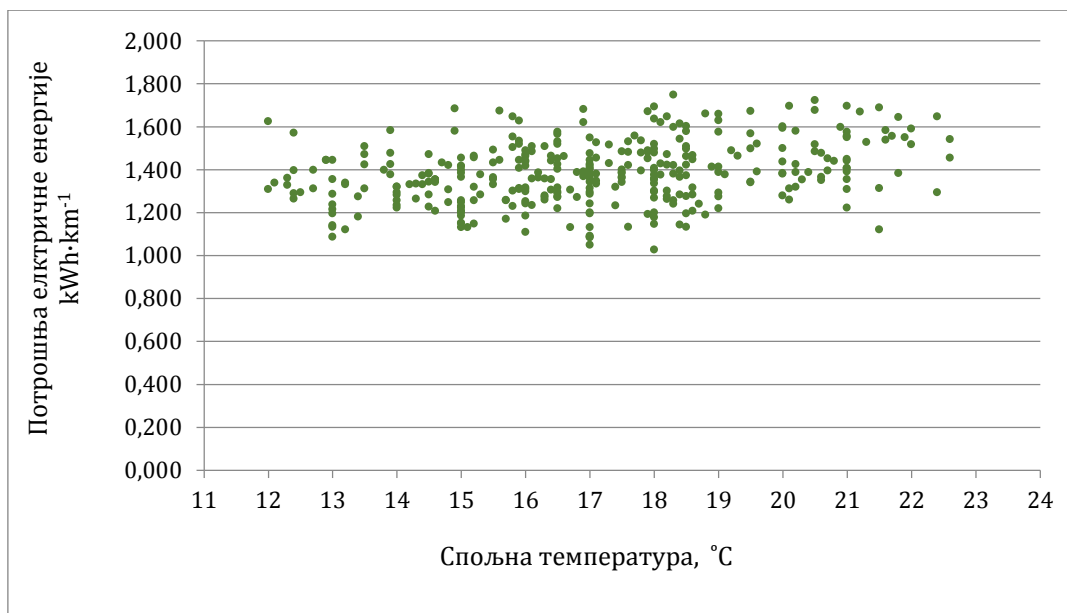
Корелативна зависност ове две величине за смер "Б" је приказано на слици 6.19.



Слика 6.19 Зависност потрошње електричне енергије и превозне брзине Е-буса, смер "Б", пролећно-јесењи период

Зависност потрошње електричне енергије Е-буса изражене у  $\text{kWh}\cdot\text{km}^{-1}$  и остварених превозних брзина изражених у  $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ , које су остварене у пролећно-јесењем периоду за смер "Б", описује се степеном функцијом другог реда  $y = 0,0022x^2 - 0,1033x + 2,4289$  и коефицијентом корелације  $R^2=0,931$ , што је веома добро слагање криве са резултатима мерења и потврђује део полазне Хипотезе 3 да потрошња електричне енергије Е-буса зависи од превозне брзине.

Зависност потрошње електричне енергије Е-буса и спољне температуре [144] која је остварена у смеру "Б" приказана је на слици 6.20.

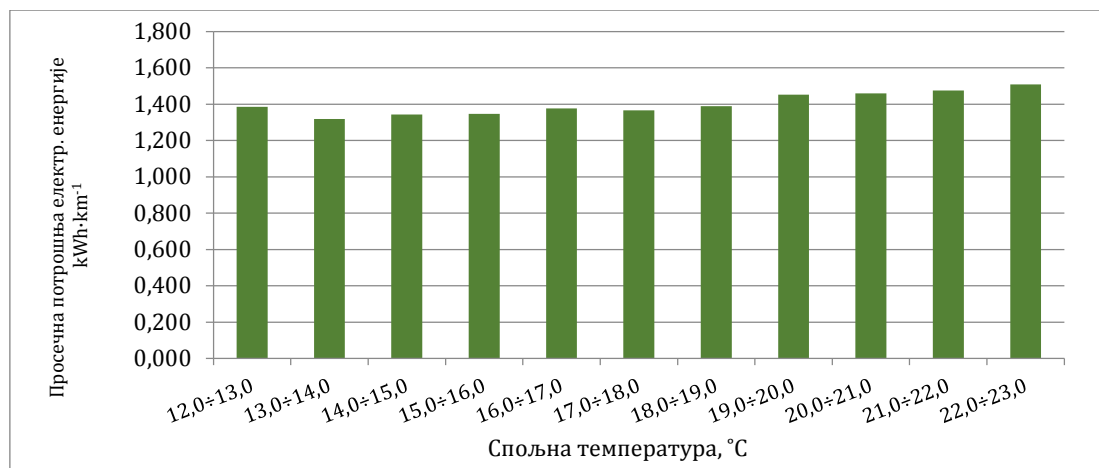


Слика 6.20 Зависност потрошње електричне енергије Е-буса и спољне температуре, смер "Б", пролећно-јесењи период

Анализа узорка од 347 мерења у смеру "Б" остварене потрошње електричне енергије Е-буса изражене у  $\text{kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ , при различитим спољним температурама приказано је у табели 6.18 и слици 6.21.

Табела 6.18 Просечна потрошња електричне енергије Е-буса, за различите спољне температуре, смер "Б", пролећно-јесењи период

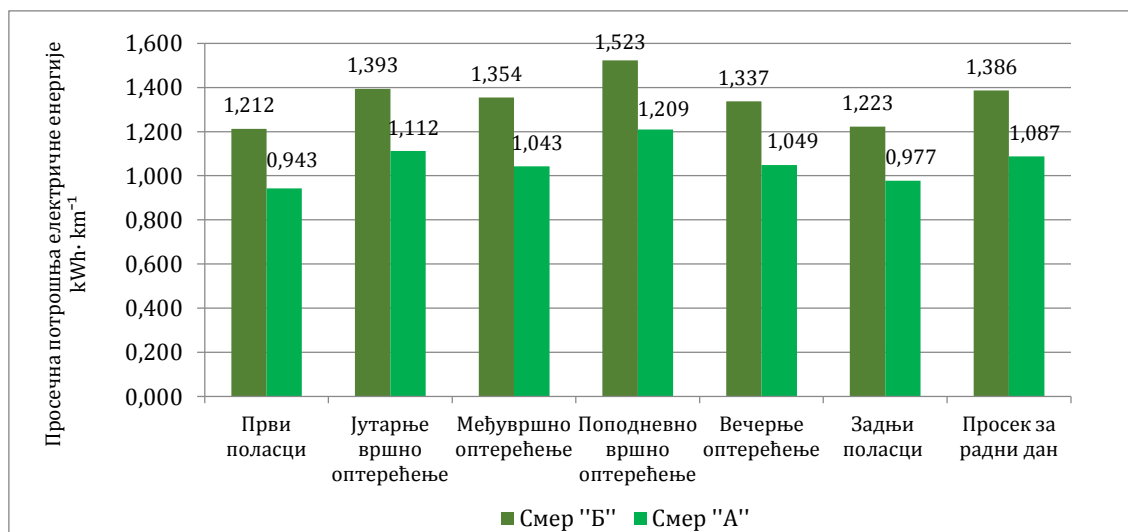
| Интервал спољне температуре<br>°C | Величина Узорка | Просечна потрошња у интервалу<br>$\text{kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ |
|-----------------------------------|-----------------|--|
| 12,0÷13,0                         | 14              | 1,385  |
| 13,0÷14,0                         | 23              | 1,319  |
| 14,0÷15,0                         | 29              | 1,343  |
| 15,0÷16,0                         | 47              | 1,346  |
| 16,0÷17,0                         | 50              | 1,376  |
| 17,0÷18,0                         | 52              | 1,366  |
| 18,0÷19,0                         | 58              | 1,389  |
| 19,0÷20,0                         | 18              | 1,452  |
| 20,0÷21,0                         | 27              | 1,459  |
| 21,0÷22,0                         | 23              | 1,476  |
| 22,0÷23,0                         | 6               | 1,508  |
| <b>Укупно</b>                     | <b>347</b>      |  |



Слика 6.21 Расподела просечне потрошње електричне енергије Е-буса у зависности од спољне температуре, смер "Б", пролећно-јесењи период

Из табеле 6.18 и слике 6.21 закључује се да просечне потрошње електричне енергије Е-буса имају веома мала одступања у посматраним температурним опсезима. Када је спољна температура у опсегу од +14 °C до +19 °C, разлика у оствареним потрошњама је минимална. При спољним температурама од +12 °C до +13 °C, забележена је већа потрошња електричне енергије Е-буса, што је очекивано као последица коришћења система за грејање путничког простора које је присутно у јутарњим часовима рада возила као и при спољним температурама од +19 °C до +23 °C, где је коришћен систем за хлађење унутрашњости возила најчешће у периоду поподневног вршног оптерећења када је број путника у возилу највећи и када су спољне температуре достизале највише дневне вредности.

На слици 6.22 дат је упоредни приказ остварене просечне потрошње електричне енергије Е-буса на линији ЕКО 1, за смер "А" и смер "Б" у посматраном периоду.



Слика 6.22 Упоредни приказ остварене просечне потрошње електричне енергије Е-буса, за смер "А" и смер "Б", пролећно-јесењи период

Са слике се уочава велика разлика у просечној потрошњи електричне енергије Е-буса које су остварене у смеру "А" у поређењу са смером "Б" за сваки карактеристични период рада у току дана, што је доказано коришћењем теста о

једнакости средњих вредности, где су вредности променљиве  $|t|$  вишеструко веће од критичне вредности 1,96, чиме се доказује део *Хипотезе 3* да потрошња електричне енергије зависи од оптерећења возила и карактеристика трасе (нагиб пута).

У приказаној статистичкој анализи потрошње електричне енергије Е-буса током пролећно-јесењег периода детаљно су истражене тенденције промена и разлика по смеровима и карактеристичним периодима рада током радног дана. Интересантно је упоредити добијене резултате просечне потрошње електричне енергије Е-буса изражене у  $\text{kWh}\cdot\text{km}^{-1}$  за радни дан са резултатима који су остварени током нерадних дана (субота, недеља). Случајним избора узорка од 106 мерења (53 мерења за смер "А" и 53 мерења за смер "Б") који се односе на рад Е-буса по реду вожње за суботу/недељу [140], добијени су резултати који су представљени у табели 6.19.

Табела 6.19 Упоредни приказ просечне потрошње електричне енергије Е-буса, радни дан-субота/недеља, пролећно-јесењи период

|               | Просечна потрошња електричне енергије $\text{kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ |          | Стандардно одступање потрошње електричне енергије $\text{kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ |          | Просек потрошње електричне енергије Е-буса $\text{kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ | Стандардно одступање потрошње електричне енергије $\text{kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ |
|---------------|---|----------|---|----------|--|---|
|               | Смер "А"  | Смер "Б" | Смер "А"  | Смер "Б" | Смер "А" + Смер "Б"  | Смер "А" + Смер "Б"   |
| Радни дан     | 1,087   | 1,386    | 0,153   | 0,143    | 1,234  | 0,148   |
| Субота/недеља | 1,035   | 1,325    | 0,106   | 0,145    | 1,180  | 0,125   |

Добијени резултати доказују да постоји значајна статистичка разлика у оствареним просечним потрошњама електричне енергије које су остварене радним даном у односу на суботу с обзиром да је вредност  $|t| > 1,96$ .

Ово је очекивано с обзиром да је у дане викенда број путника који користи возила јавног градског транспорта мањи, па је то главни утицајни фактор на мању потрошњу Е-буса током викенда. Такође, у дане викенда интензитет саобраћајног тока на улицама је мањи, што омогућава краће време превоза у смеру "А", односно смеру "Б". У анализираном примеру рада Е-буса суботом, као и недељом или државним празницима, када је значајно мањи број путника који се превозе и када су веће превозне брзине, просечна потрошња електричне енергије Е-буса има тренд пада, што доказује део полазне *Хипотезе 3* да потрошња електричне енергије зависи од оптерећења возила.

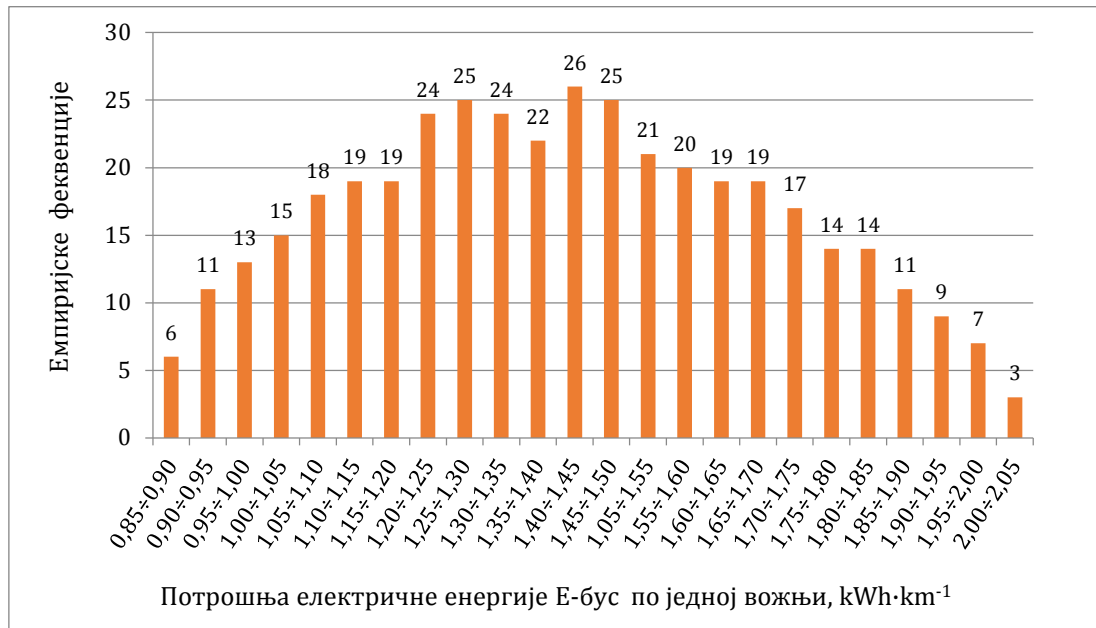
### 6.8.2 Анализа потрошње електричне енергије Е-буса на линији ЕКО 1 у летњем периоду

Прикупљање података о потрошњи електричне енергије током летњег периода рада Е-буса на линији ЕКО 1 обухватило је узорак од 401 мерења за смер "А" и 422 мерења за смер "Б" [140]. За оба статистичка скупа израчунате су вредности  $X_s$  и  $s_d$ , према једначинама 6.14 и 6.15.

#### Смер "А" (Вуков споменик- Насеље Белвил), летњи период

У смеру "А", током летњег периода рада Е-буса, анализиран је узорак од 401 мерења и добијена је просечна вредност потрошње електричне енергије од 1,417

$\text{kWh}\cdot\text{km}^{-1}$  и стандардно одступање  $0,285 \text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ . Резултати мерења (емпиријска расподела) анализираниг узорка по класама потрошње електричне енергије приказани су на слици 6.23.



Слика 6.23 Емпиријска расподела потрошње електричне енергије Е-буса, смер "А", летњи период

Потрошња електричне енергије Е-буса у смеру "А" у летњем периоду је сагласна са нормалном расподелом, што је проверено  $\chi^2$ -тестом ( $\chi^2=19,175 < \chi_{0,05}^{2(19)}=30,175$ ). На основу снимљеног узорка од 401 мерења превозне брзине које су возила остварила у смеру "А", добијена је средња превозна брзина  $13,88 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  са стандардним одступањем од  $1,61 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ .

Преглед остварених просечних потрошњи електричне енергије Е-буса и остварених средњих превозних брзина током карактеристичних периода рада у летњем периоду, приказан је у табели 6.20.

Табела 6.20 Просечна потрошња електричне енергије и средња превозна брзина Е-буса, смер "А", летњи период

| Карактеристични период рада | Величина узорка | Просечна потрошња електричне енергије $\text{kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ | Стандардно одступање $\text{kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ | Средња превозна брзина $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ | Стандардно одступање $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ |
|-----------------------------|-----------------|---|--|--|--|
| Први поласци                | 17              | 0,972   | 0,072  | 16,20  | 1,06   |
| Јутарње вршно оптерећење    | 65              | 1,249   | 0,227  | 14,06  | 1,74   |
| Међувршно оптерећење        | 92              | 1,449   | 0,211  | 13,91  | 1,38   |
| Поподневно вршно оптерећење | 110             | 1,670   | 0,218  | 12,77  | 1,09   |
| Вечерње оптерећење          | 93              | 1,362   | 0,227  | 14,25  | 1,43   |
| Задњи поласци               | 24              | 1,126   | 0,147  | 15,28  | 1,41   |
| <b>Укупно</b>               | <b>401</b>      | <b>1,417</b>  | <b>0,285</b>   | <b>13,88</b>   | <b>1,61</b>  |

Просечна потрошња електричне енергије Е-буса различита је за сваки карактеристични период и потврђује део полазне *Хипотезе 3* да потрошња електричне енергије зависи од карактеристичног периода рада Е-буса на линији.

Разлика просечне потрошње електричне енергије у свим комбинацијама поређења има статистички значај, пошто је вредност променљиве  $|t| > 1,96$ .

Потрошња електричне енергије Е-буса при одређеним превозним брзинама које су остварене у смеру "А", током летњег периода приказана је на слици 6.24. и табели 6.21.



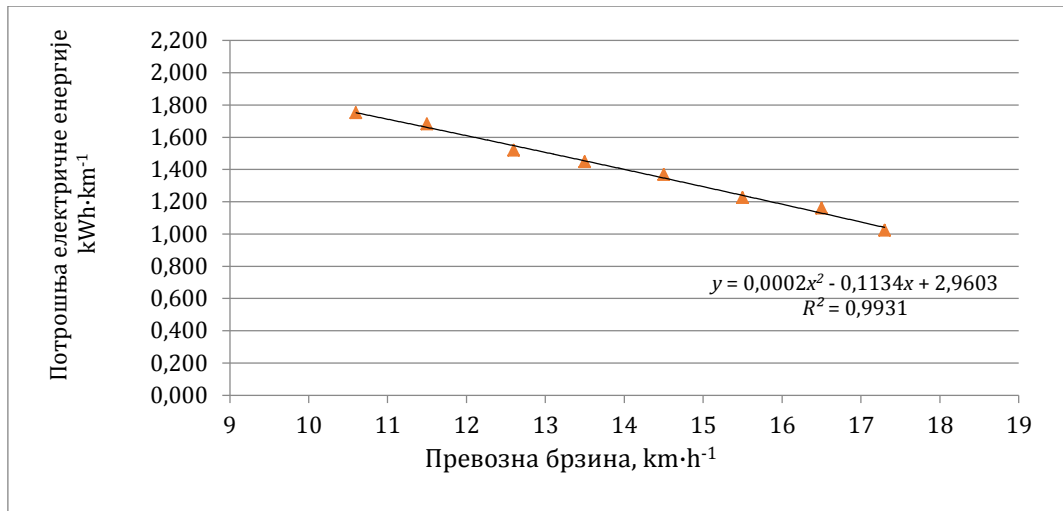
Слика 6.24 Потрошње електричне енергије и превозне брзине, смер "А", летњи период

Табела 6.21 Просечна потрошња електричне енергије Е-буса и превозне брзине, смер "А", летњи период

| Интервал превозне брзине $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ | Фреквенција | Просечна потрошња у интервалу $\text{kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ |
|--|-------------|---|
| 10,0÷11,0  | 10          | 1,751   |
| 11,0÷12,0  | 36          | 1,681   |
| 12,0÷13,0  | 88          | 1,519   |
| 13,0÷14,0  | 94          | 1,447   |
| 14,0÷15,0  | 83          | 1,368   |
| 15,0÷16,0  | 41          | 1,226   |
| 16,0÷17,0  | 36          | 1,159   |
| 17,0÷18,0  | 13          | 1,022   |
| <b>Укупно</b>  | <b>401</b>  |   |

Корелативна зависност потрошње електричне енергије Е-буса и превозне брзине остварена у летњем периоду рада за смер "А", је приказана на слици 6.25.

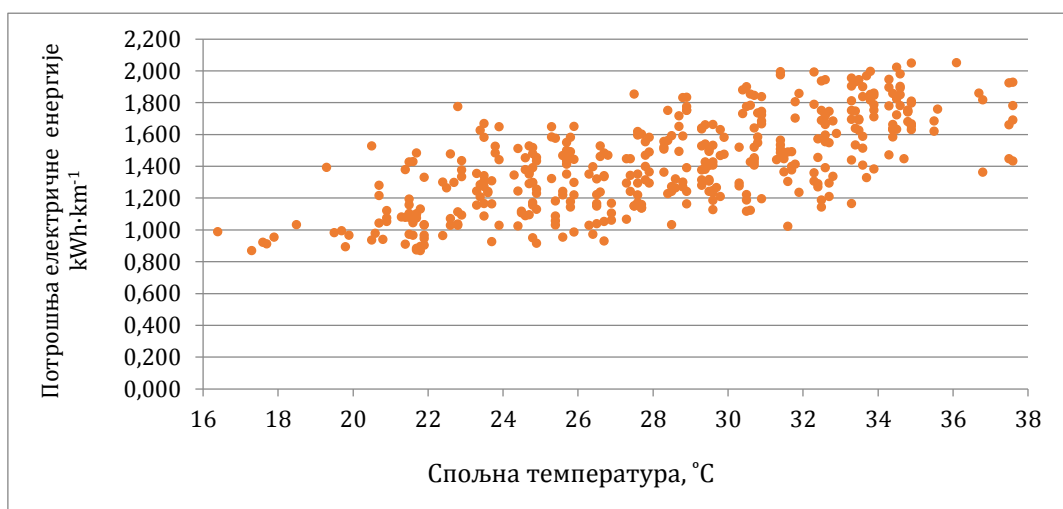




Слика 6.25 Зависност потрошње електричне енергије и превозне брзине Е-буса, смер "А", летњи период

Зависност потрошње електричне енергије изражене у kWh·km<sup>-1</sup> од превозне брзине изражене у km·h<sup>-1</sup>, описује се степеном функцијом другог реда:  $y = 0,0002x^2 - 0,1134x + 2,9603$  са коефицијентом корелације  $R^2=0,9931$ , што потврђује добро слагање криве са резултатима мерења. Ова корелативна зависност може се описати и линераном зависношћу:  $y = -0,1092x + 2,9314$ , где је  $R^2=0,993$ .

У летњем периоду рада Е-буса на линији ЕКО 1 за смер "А", анализирана је потрошња електричне енергије Е-буса у зависности од спољне температуре [144] која је регистрована током рада Е-буса. Изабрани су дани када су спољне температуре биле су у опсегу од +16 °C (јутарње температуре) до +38 °C (максималне дневне). У летњем периоду да би се обезбедио задовољавајући комфор путовања, за хлађење путничког и возачког простора, присутно је интензивно коришћење система за хлађење возила, што има утицај на већу потрошњу електричне енергије Е-буса. Зависност потрошње електричне енергије Е-буса од спољне температуре која је остварена у смеру "А" током летњег периода приказана је на слици 6.26.

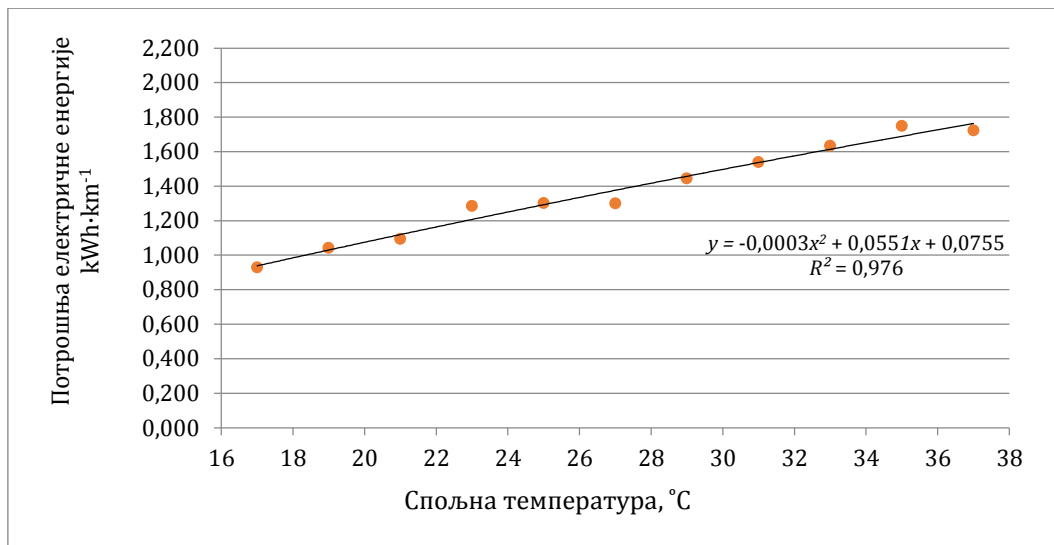


Слика 6.26 Потрошња електричне енергије Е-буса и спољне температуре, смер "А", летњи период

Расподела потрошње електричне енергије Е-буса изражене у  $\text{kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ , остварених при различитим спољним температурама приказана је у табели 6.22 и на слици 6.27.

Табела 6.22 Просечна потрошња електричне енергије Е-буса, за различите спољне температуре, смер "А", летњи период

| Интервал спољне температуре<br>°C | Фреквенција | Просечна потрошња у интервалу<br>$\text{kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ |
|-----------------------------------|-------------|--|
| 16÷18                             | 5           | 0,927  |
| 18÷20                             | 6           | 1,040  |
| 20÷22                             | 38          | 1,093  |
| 22÷24                             | 38          | 1,284  |
| 24÷26                             | 55          | 1,300  |
| 26÷28                             | 49          | 1,298  |
| 28÷30                             | 58          | 1,444  |
| 30÷32                             | 50          | 1,537  |
| 32÷34                             | 58          | 1,632  |
| 34÷36                             | 33          | 1,747  |
| 36÷38                             | 11          | 1,721  |
| <b>Укупно</b>                     | <b>401</b>  |  |



Слика 6.27 Зависност потрошње електричне енергије Е-буса и спољне температуре, смер "А", летњи период

Зависност потрошње електричне енергије Е-буса и спољне температуре, која је остварена у летњем периоду рада за смер "А", описује се степеном функцијом другог реда:  $y = -0,0003x^2 + 0,0551x + 0,0755$  и коефицијентом корелације  $R^2=0,976$ , што потврђује добро слагање криве са резултатима мерења.

Ова зависност са готово идентичном корелацијом  $R^2=0,974$  може се представити и линеарном зависношћу:  $y = 0,0412x + 0,2532$ .

У летњем периоду рада Е-буса најмања потрошња електричне енергије Е-буса је у првим јутарњим поласцима, када су спољне температуре између 16 °C и 18 °C, кад нема потребе за коришћењем система за хлађење возила и када је број путника који се превози најмањи.

Потрошња електричне енергије изражена у kWh·km<sup>-1</sup> у овом карактеристичном периоду рада (табела 6.20) је приближно иста као и током пролећно-јесењег периода (табела 6.13).

Са порастом спољне температуре, интензитет коришћења и ангажована снага система за хлађење се повећавају, тако да укупна потрошња Е-буса расте према описаној степеној функцији другог реда.

### Смер "Б" (Насеље Белвил-Вуков споменик), летњи период

У смеру "Б", током летњег периода рада Е-буса, анализиран је узорак од 422 мерења и добијена је просечна вредност потрошње електричне енергије Е-буса од 1,661 kWh·km<sup>-1</sup> и стандардно одступање 0,228 kWh·km<sup>-1</sup>.

Резултати мерења (емпиријска расподела) анализираниг узорка од 422 мерења по класама потрошње електричне енергије приказани су на слици 6.28.



Слика 6.28 Емпиријска расподела потрошње електричне енергије Е-буса, смер "Б", летњи период

Потрошња електричне енергије Е-буса у смеру "Б" у летњем периоду је сагласна са нормалном расподелом што је проверено  $\chi^2$ -тестом ( $\chi^2=16,122 < \chi_{0,05}^{2(16)}=26,296$ ).

На основу снимљеног узорка од 422 мерења превозне брзине која су возила остварила у смеру "Б", добијена је средња превозна брзина 14,88 km·h<sup>-1</sup> са стандардним одступањем од 1,56 km·h<sup>-1</sup>.

Преглед остварене просечне потрошње електричне енергије Е-буса и средње превозне брзине током карактеристичних периода рада у летњем периоду приказан је у табели 6.23.

Табела 6.23 Просечна потрошња електричне енергије и средња превозна брзина Е-буса, смер "Б", летњи период

| Карактеристични период рада | Величина узорка | Просечна потрошња електр. енергије kWh·km <sup>-1</sup> | Стандардно одступање kWh·km <sup>-1</sup> | Средња превозна брзина km·h <sup>-1</sup> | Стандардно одступање km·h <sup>-1</sup> |
|-----------------------------|-----------------|---|---|---|---|
| Први поласци                | 20              | 1,232   | 0,111                                     | 17,42                                     | 1,12                                    |
| Јутарње вршно оптерећење    | 69              | 1,558   | 0,151                                     | 14,96                                     | 1,21                                    |
| Међувршно оптерећење        | 98              | 1,665   | 0,157                                     | 14,64                                     | 1,23                                    |
| Поподневно вршно оптерећење | 115             | 1,877   | 0,163                                     | 13,76                                     | 1,19                                    |
| Вечерње оптерећење          | 94              | 1,626   | 0,181                                     | 15,40                                     | 1,27                                    |
| Задњи поласци               | 26              | 1,424   | 0,118                                     | 16,68                                     | 1,35                                    |
| <b>Укупно</b>               | <b>422</b>      | <b>1,661</b>  | <b>0,228</b>                              | <b>14,88</b>                              | <b>1,56</b>                             |

Просечна потрошња електричне енергије Е-буса различита је за сваки карактеристични период има статистички значај осим у поређењу међувршног оптерећења и вечерњег оптерећења, где је вредност променљиве  $|t|=1,597 < 1,96$ .

Потрошње електричне енергије Е-буса и превозне брзине које су остварене у смеру "Б" током летњег периода приказане су на слици 6.29 и табели 6.24.

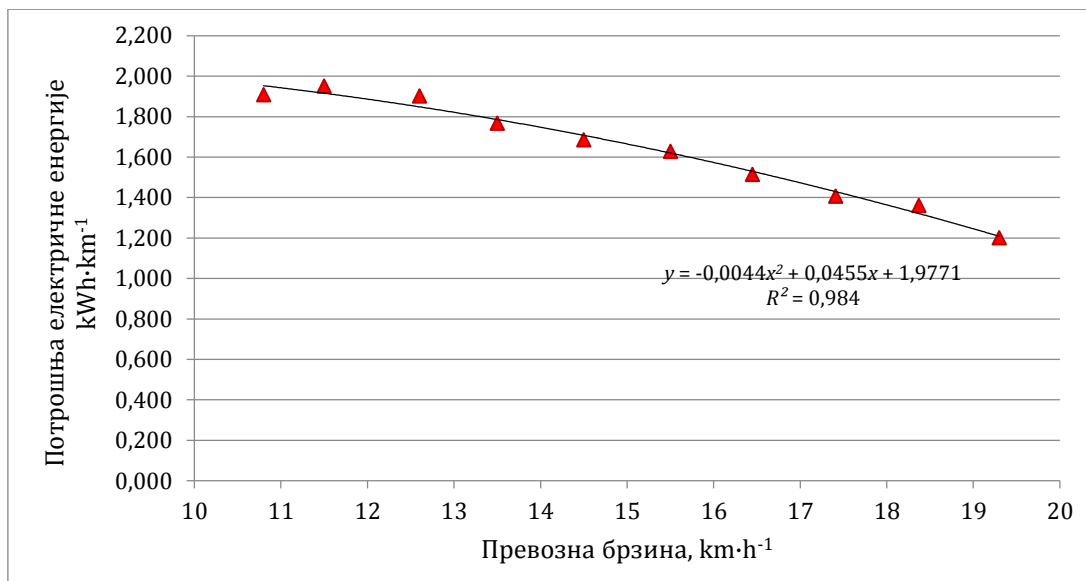


Слика 6.29 Потрошње електричне енергије и превозне брзине, смер "Б", летњи период

Табела 6.24 Просечна потрошња електричне енергије Е-буса и превозне брзине, смер "Б", летњи период

| Интервал превозне брзине $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ | Фреквенција | Просечна потрошња у интервалу $\text{kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ |
|--|-------------|---|
| 10,0÷11,0  | 1           | 1,907   |
| 11,0÷12,0  | 11          | 1,951   |
| 12,0÷13,0  | 31          | 1,901   |
| 13,0÷14,0  | 80          | 1,767   |
| 14,0÷15,0  | 115         | 1,685   |
| 15,0÷16,0  | 90          | 1,627   |
| 16,0÷17,0  | 55          | 1,514   |
| 17,0÷18,0  | 22          | 1,406   |
| 18,0÷19,0  | 14          | 1,360   |
| 19,0÷20,0  | 3           | 1,200   |
| <b>Укупно</b>  | <b>422</b>  |   |

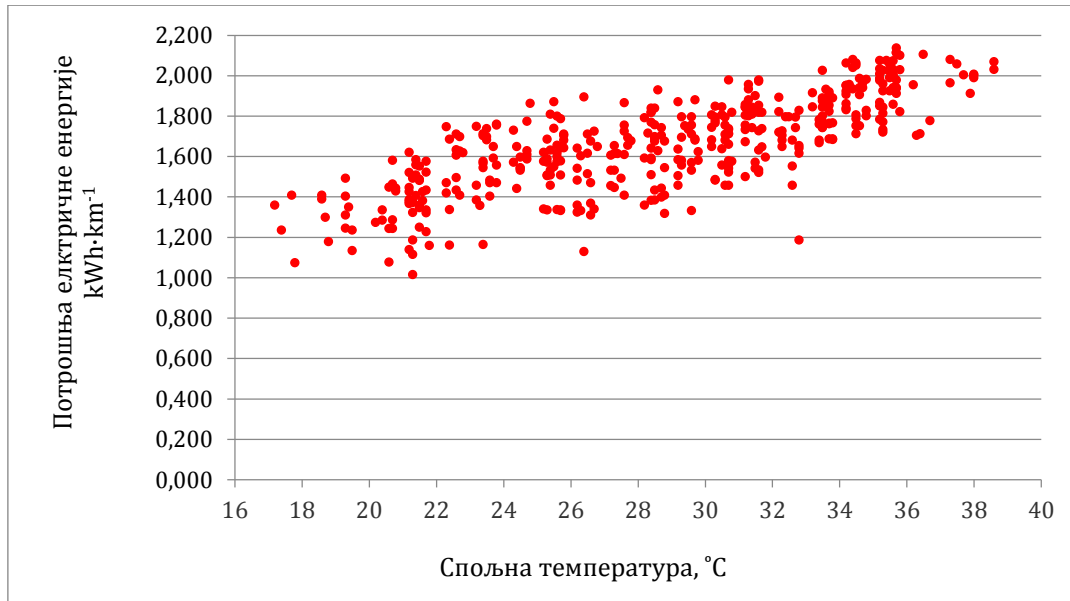
Функционална веза између потрошње електричне енергије Е-буса, изражене у  $\text{kWh}\cdot\text{km}^{-1}$  и превозне брзине  $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ , приказана је на слици 6.30.



Слика 6.30 Зависност потрошње електричне енергије и превозне брзине Е-буса, смер "Б", летњи период

Зависност потрошње електричне енергије Е-буса изражене у  $\text{kWh}\cdot\text{km}^{-1}$  и остварених превозних брзина изражених у  $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ , која је остварена у летњем периоду рада за смер "Б", описује се степеном функцијом другог реда:  $y = -0,0044x^2 + 0,0455x + 1,9771$  и коефицијентом корелације  $R^2=0,984$ . Ова зависност са довољном тачношћу може се представити као линеарна:  $y = -0,0872x + 2,9387$  и коефицијентом корелације  $R^2=0,970$ .

Зависност потрошње електричне енергије Е-буса и спољне температуре [144] која је остварена у смеру "Б" приказана је на слици 6.31.

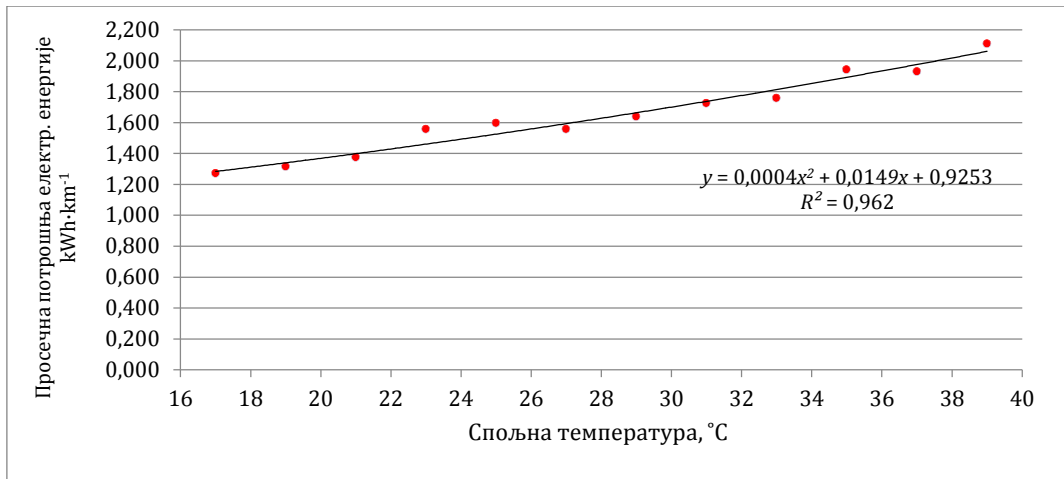


Слика 6.31 Остварене потрошње електричне енергије Е-буса и спољне температуре, смер "Б", летњи период

Расподела остварене потрошње електричне енергије Е-буса при различитим спољним температурама је приказано у табели 6.25 и на слици 6.32.

Табела 6.25 Просечна потрошња електричне енергије Е-буса, за различите спољне температуре, смер "Б", летњи период

| Интервал спољне температуре<br>°C | Фреквенција | Просечна потрошња у интервалу<br>kWh·km <sup>-1</sup> |
|-----------------------------------|-------------|---|
| 16,0÷18,0                         | 4           | 1,268   |
| 18,0÷20,0                         | 11          | 1,312   |
| 20,0÷22,0                         | 46          | 1,373   |
| 22,0÷24,0                         | 37          | 1,554   |
| 24,0÷26,0                         | 46          | 1,595   |
| 26,0÷28,0                         | 36          | 1,555   |
| 28,0÷30,0                         | 53          | 1,635   |
| 30,0÷32,0                         | 63          | 1,722   |
| 32,0÷34,0                         | 46          | 1,756   |
| 34,0÷36,0                         | 65          | 1,939   |
| 36,0÷38,0                         | 10          | 1,927   |
| 38,0÷40,0                         | 5           | 2,108   |
| <b>Укупно</b>                     | <b>422</b>  |   |

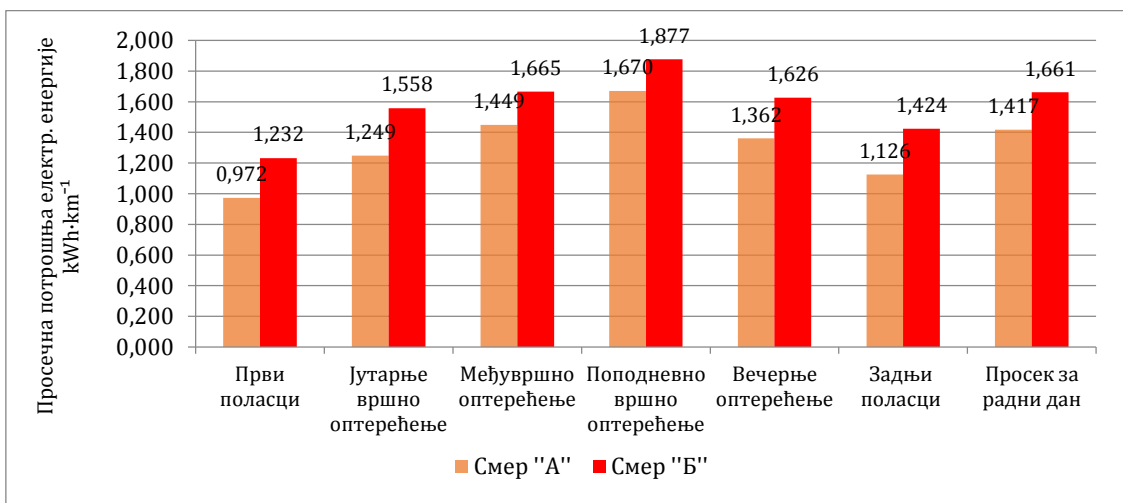


Слика 6.32 Зависност потрошње електричне енергије Е-буса и спољне температуре, смер "Б", летњи период

Зависност потрошње електричне енергије Е-буса и спољне температуре која је остварена у летњем периоду рада за смер "Б", описује се степеном функцијом другог реда:  $y = 0,0004x^2 + 0,0149x + 0,9253$  и коефицијентом корелације  $R^2=0,962$  или линеарном везом:  $y = 0,0353x + 0,656$  где је  $R^2=0,958$ .

У летњем периоду рада Е-буса, слично као и код анализе потрошње електричне енергије у смеру "А", најмања потрошња електричне енергије Е-буса у смеру "Б" је у првим јутарњим поласцима када су спољне температуре између 16 °C и 18 °C, кад је вероватноћа коришћења система за хлађење сведена на најмању меру и када је број путника који се превози најмањи. Са порастом спољне температуре интензитет коришћења и ангажована снага система за хлађење се повећавају, тако да укупна потрошња Е-буса расте према описаној степеној функцији другог реда.

На слици 6.33 дат је упоредни приказ остварене просечне потрошње електричне енергије Е-буса на линији ЕКО 1, за смер "А" и смер "Б" у посматраном летњем периоду рада.



Слика 6.33 Упоредни приказ остварених просечних потрошњи електричне енергије Е-буса, за смер "А" и смер "Б", летњи период

Из слике се закључује да су разлике просечне потрошње електричне енергије Е-буса ако их упоредимо за сваки карактеристични период рада у току дана у смеру "А" и смеру "Б" веома изражене.

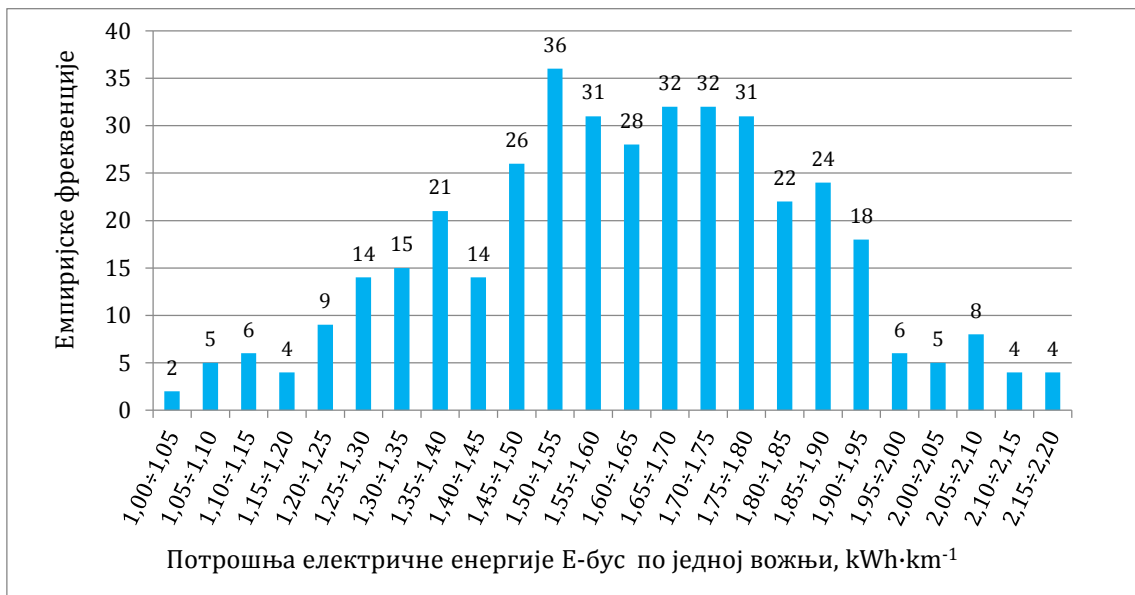
Добијене вредности променљиве  $|t|$  које су вишеструко веће од критичне вредности 1,96 доказују изузетно високу разлику у просечној потрошњи електричне енергије Е-буса за све карактеристичне периоде који се остварују у смеру "А" у поређењу са смером "Б" чиме је доказан део *Хипотезе 3* да потрошња електричне енергије зависи од оптерећења возила, карактеристика трасе (нагиб пута) и коришћења система за хлађење.

### 6.8.3 Анализа потрошње електричне енергије Е-буса на линији ЕКО 1 у зимском периоду

Током зимског периода рада Е-буса на линији ЕКО 1 обухваћен је узорак од 397 мерења за смер "А" и 392 мерења за смер "Б" [140]. За оба статистичка скупа израчунате су  $X_s$  и  $s_d$ , према једначинама 6.14 и 6.15.

#### Смер "А" (Вуков споменик- Насеље Белвил), зимски период

У смеру "А", током зимског периода рада Е-буса, анализиран је узорак од 397 мерења и добијена је просечна вредност потрошње електричне енергије  $1,623 \text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$  и стандардно одступање  $0,240 \text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ . Резултати мерења (емпиријска расподела) анализираниг узорка по класама потрошње електричне енергије приказана је на слици 6.34.



Слика 6.34 Емпиријска расподела потрошње електричне енергије Е-буса, Смер "А", зимски период

Потрошња електричне енергије Е-буса у смеру "А" у зимском периоду је сагласна са нормалном расподелом, што је проверено  $\chi^2$ -тестом ( $\chi^2=18,454 < \chi_{0,05}^{2(18)}=28,869$ ). На основу снимљеног узорка која су возила остварила у смеру "А", добијена је средња превозна брзина  $12,89 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  и стандардно одступање  $1,40 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . Преглед остварене просечне потрошње електричне енергије Е-буса и



остварене средње превозне брзине током карактеристичних периода рада у зимском периоду приказан је у табели 6.26.

Табела 6.26 Просечна потрошња електричне енергије и средња превозна брзина Е-буса, смер "А", зимски период

| Карактеристични период рада | Величина узорка | Просечна потрошња електр. енергије kWh·km <sup>-1</sup> | Стандардно одступање kWh·km <sup>-1</sup> | Средња превозна брзина km·h <sup>-1</sup> | Стандардно одступање km·h <sup>-1</sup> |
|-----------------------------|-----------------|---|---|---|---|
| Први поласци                | 18              | 1,845   | 0,173                                     | 14,06                                     | 1,45                                    |
| Јутарње вршно оптерећење    | 64              | 1,704   | 0,254                                     | 12,54                                     | 1,16                                    |
| Међувршно оптерећење        | 89              | 1,528   | 0,204                                     | 13,22                                     | 1,30                                    |
| Поподневно вршно оптерећење | 121             | 1,647   | 0,249                                     | 12,42                                     | 1,22                                    |
| Вечерње оптерећење          | 91              | 1,599   | 0,219                                     | 12,89                                     | 1,48                                    |
| Задњи поласци               | 14              | 1,516   | 0,157                                     | 14,91                                     | 0,47                                    |
| <b>Укупно</b>               | <b>397</b>      | <b>1,623</b>  | <b>0,240</b>                              | <b>12,89</b>                              | <b>1,40</b>                             |

Разлика просечне потрошње електричне енергије изражене у kWh·km<sup>-1</sup> има значајну разлику у свим поређењима између првих полазака са осталим карактеристичним периодима током дана, с обзиром да је вредност променљиве  $|t| > 1,96$  у свим комбинацијама поређења, односно  $|t| > t_{0,05}^{k=30} = 2,042$  у поређењу са потрошњом електричне енергије код задњих полазака.

Разлика просечне потрошње електричне енергије нема статистички значај у поређењу између јутарњег вршног оптерећења и поподневног вршног оптерећења пошто је  $|t| = 1,461 < 1,96$ , између поподневног вршног оптерећења и вечерњег оптерећења  $|t| = 1,504 < 1,96$ , између вечерњег оптерећења и задњих полазака  $|t| = 1,727 < 1,96$  и између међувршног оптерећења и задњих полазака  $|t| = 0,245 < 1,96$ .

У зимском периоду највећа потрошња електричне енергије је ујутро при првим поласцима Е-буса, с обзиром да су јутарње температуре најниже, а коришћење система за грејање најинтензивније и са највећом ангажованом снагом, како би се постигла потребна температура амбијента у путничком и возачевом простору. Може се извести закључак да у зимском периоду рада Е-буса на линији ЕКО 1 доминантан утицај на потрошњу електричне енергије има интензитет и ангажована снага рада система за грејање.

На основу анализе резултата просечне потрошње електричне енергије и остварених средњих превозних брзина по карактеристичним периодима рада Е-буса приказаних у табели 6.26, закључује се да је приликом првих полазака, када су саобраћајни услови најповољнији у смислу најмањег броја путника у возилу и превозне брзине од 14,06 km·h<sup>-1</sup>, која је већа од превозних брзина остварених током јутарњег, међувршног, поподневног и вечерњег оптерећења, измерена је највећа просечна потрошња електричне енергије Е-буса од 1,845 kWh·km<sup>-1</sup>, што доказује део полазне *Хипотезе 3* да на потрошњу електричне енергије Е-буса има изразит утицај систем за грејање унутрашњости возила.

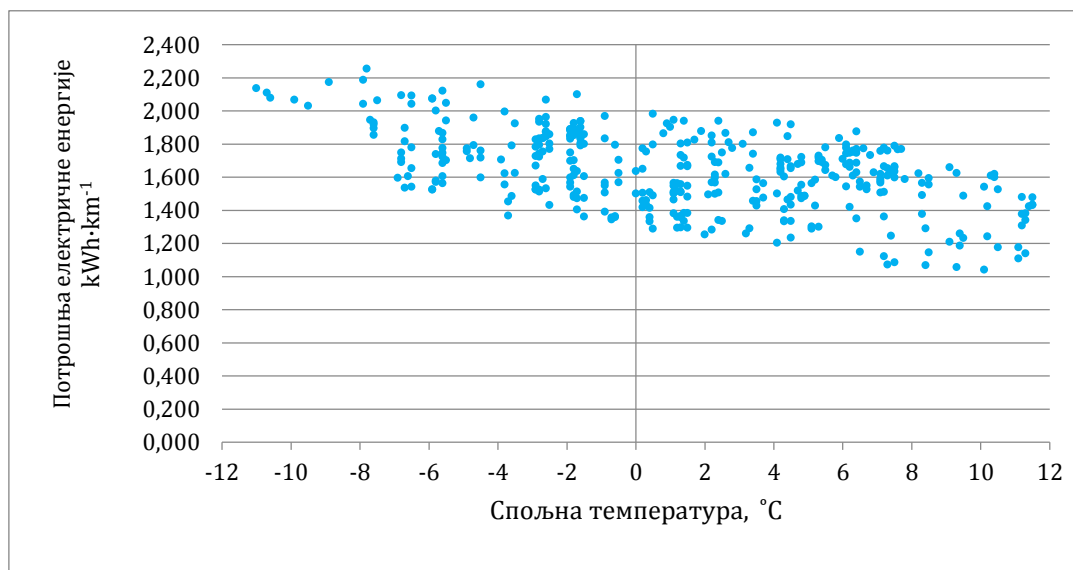
У поподневном вршном оптерећењу, кад је средња превозна брзина најмања 12,42 km·h<sup>-1</sup>, просечна потрошња је 1,648 kWh·km<sup>-1</sup>, чиме се потврђује доминантни

утицајни фактор рада система за грејање, независно од остварене превозне брзине. Треба истаћи да у карактеристичним периодима рада Е-буса (јутарње и поподневно вршно оптерећење), када је присутан највећи број путника у возилу, ангажованост система за грејање се смањује с обзиром да људско тело ослобађа топлотну енергију.

У зимском периоду рада Е-буса на линији ЕКО 1 за смер "А", анализирана је потрошња електричне енергије Е-буса у зависности од спољне температуре [144] која је регистрована током рада Е-буса. Приликом избора дана када су рађена мерења, спољне температуре биле су у опсегу од  $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$  (јутарње температуре) до  $+12\text{ }^{\circ}\text{C}$  (максималне дневне). Расподела потрошње електричне енергије Е-буса остварених при различитим спољним температурама је приказано у табели 6.27 и на слици 6.35.

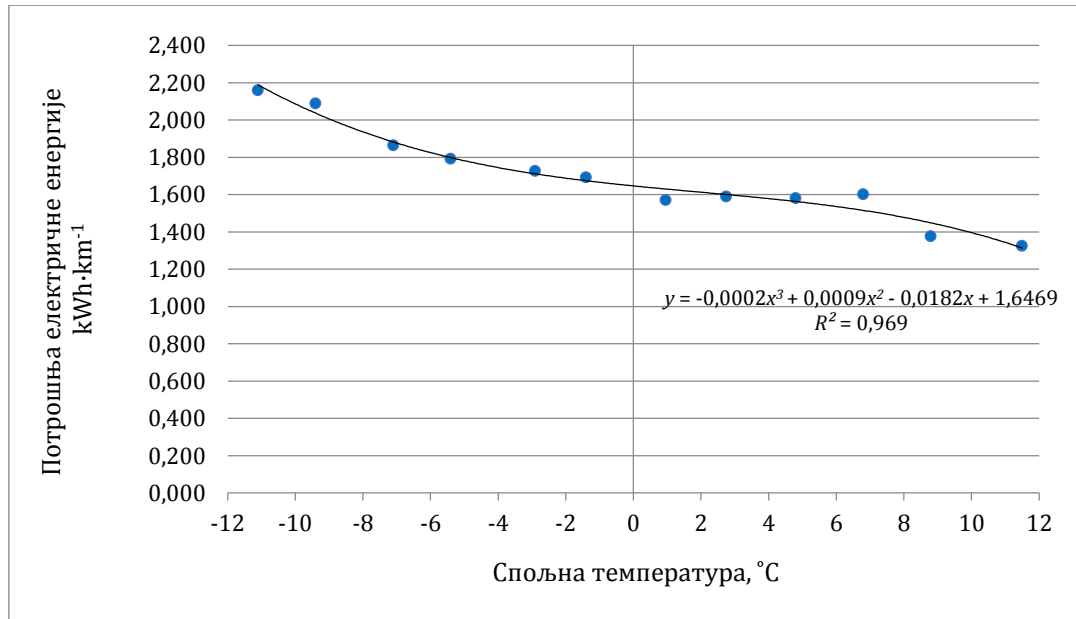
Табела 6.27 Просечна потрошња електричне енергије Е-буса, за различите спољне температуре, смер "А", зимски период

| Интервал спољне температуре $^{\circ}\text{C}$ | Фреквенција | Просечна потрошња у интервалу $\text{kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ |
|--|-------------|---|
| $-12,0 \div -10,0$                             | 4           | 2,159   |
| $-10,0 \div -8,0$                              | 3           | 2,089   |
| $-8,0 \div -6,0$                               | 23          | 1,864   |
| $-6,0 \div -4,0$                               | 30          | 1,792   |
| $-4,0 \div -2,0$                               | 40          | 1,727   |
| $-2,0 \div 0,0$                                | 54          | 1,692   |
| $0,0 \div 2,0$                                 | 53          | 1,570   |
| $2,0 \div 4,0$                                 | 35          | 1,590   |
| $4,0 \div 6,0$                                 | 50          | 1,580   |
| $6,0 \div 8,0$                                 | 52          | 1,601   |
| $8,0 \div 10,0$                                | 17          | 1,377   |
| $10,0 \div 12,0$                               | 36          | 1,325   |
| <b>Укупно</b>                                  | <b>397</b>  |   |



Слика 6.35 Потрошње електричне енергије и спољне температуре, смер "А", зимски период

Зависност потрошње електричне енергије Е-буса и спољне температуре која је остварена у смеру "А" током зимског периода, приказана је на слици 6.36.



Слика 6.36 Зависност потрошње електричне енергије Е-буса и спољне температуре, смер "А", зимски период

Зависност потрошње електричне енергије Е-буса изражене у kWh·km<sup>-1</sup> и спољне температуре изражене у °C, која је остварена у зимском периоду рада за смер "А", описује се степеном функцијом трећег реда:  $y = -0,0002x^3 + 0,0009x^2 - 0,0182x + 1,6469$  и коефицијентом корелације  $R^2=0,969$ .

Ова зависност са нешто мањом корелацијом  $R^2=0,935$  може се представити степеном функцијом другог реда:  $y = 0,0009x^2 - 0,032x + 1,6501$ .

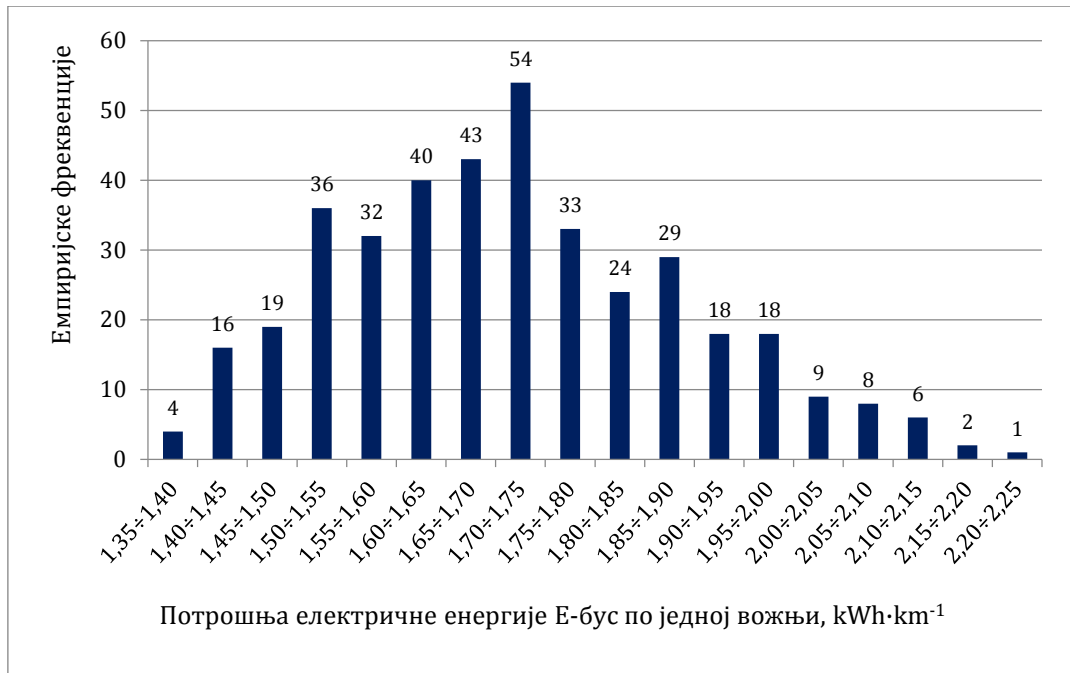
У зимском периоду рада највећа потрошња електричне енергије Е-буса је при екстремно ниским температурама, које су најчешће у раним јутарњим сатима.

Са порастом спољне температуре, потрошња се смањује према представљеној степеној функцији. При спољним температурама од 0 °C до 5 °C, потрошња електричне енергије има приближно исту вредност, а са даљим повећањем спољне температуре бележи се пад потрошње електричне енергије Е-буса.

### Смер "Б" (Насеље Белвил-Вуков споменик), зимски период

У смеру "Б", током зимског периода рада Е-буса, анализиран је узорак од 392 мерења и добијена је просечна вредност потрошње електричне енергије 1,717 kWh·km<sup>-1</sup> и стандардно одступање 0,176 kWh·km<sup>-1</sup>.

Резултати мерења (емпиријска расподела) анализираниог узорака по класама потрошње електричне енергије приказани су на слици 6.37.



Слика 6.37 Емпиријска расподела узорка потрошње електричне енергије Е-буса, смер "Б", зимски период

Потрошња електричне енергије Е-буса у смеру "Б" у зимском периоду је сагласна са нормалном расподелом, што је проверено  $\chi^2$ -тестом ( $\chi^2=22,037 < \chi_{0,05}^{2(13)}=22,362$ ).

На основу снимљеног узорка од 392 мерења превозне брзине која су возила остварила у смеру "Б", добијена је средња превозна брзина  $13,99 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  са стандардним одступањем од  $1,66 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ .

Преглед остварене просечне потрошње електричне енергије Е-буса и остварене средње превозне брзине током карактеристичних периода рада у зимском периоду приказано је у табели 6.28.

Табела 6.28 Просечна потрошња електричне енергије и средња превозна брзина Е-буса, смер "Б", зимски период

| Карактеристични период рада | Величина узорка | Просечна потрошња електричне енергије kWh·km <sup>-1</sup> | Стандардно одступање kWh·km <sup>-1</sup> | Средња превозна брзина km·h <sup>-1</sup> | Стандардно одступање km·h <sup>-1</sup> |
|-----------------------------|-----------------|--|---|---|---|
| Први поласци                | 18              | 1,846  | 0,146                                     | 15,43                                     | 1,22                                    |
| Јутарње вршно оптерећење    | 57              | 1,787  | 0,165                                     | 14,02                                     | 1,81                                    |
| Међувршно оптерећење        | 94              | 1,679  | 0,166                                     | 14,19                                     | 1,43                                    |
| Поподневно вршно оптерећење | 111             | 1,757  | 0,170                                     | 13,00                                     | 1,41                                    |
| Вечерње оптерећење          | 95              | 1,662  | 0,165                                     | 14,38                                     | 1,54                                    |
| Задњи поласци               | 17              | 1,608  | 0,185                                     | 15,60                                     | 1,14                                    |
| <b>Укупно</b>               | <b>392</b>      | <b>1,717</b>   | <b>0,176</b>                              | <b>13,99</b>                              | <b>1,66</b>                             |

Разлика просечне потрошње електричне енергије нема статистички значај у поређењу између првих полазака и јутарњег вршног оптерећења пошто је  $|t|=1,460 < 1,96$ , између јутарњег вршног оптерећења и поподневног вршног оптерећења  $|t|=1,115 < 1,96$ , између међувршног оптерећења и вечерњег оптерећења  $|t|=0,705 < 1,96$ , између међувршног оптерећења и задњих полазака  $|t|=1,481 < 1,96$  и вечерњег оптерећења и задњих полазака  $|t|=1,128 < 1,96$ .

У смеру "Б" током зимског периода очигледан је утицај система за грејање возила који је у функцији током читавог времена рада Е-буса, што доказује део полазне *Хипотезе 3* да на потрошњу електричне енергије Е-буса има изразит утицај систем за грејање унутрашњости возила.

На основу анализираних резултата потрошње електричне енергије и остварених средњих превозних брзина по карактеристичним периодима рада Е-буса приказаних у табели 6.28, произилази да приликом првих полазака, када су саобраћајни услови повољни и са високом саобраћајном брзином од  $15,43 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , остварена је највећа потрошња електричне енергије Е-буса од  $1,846 \text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ .

У поподневном шпицу, када је превозна брзина најмања  $13,00 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  потрошња је  $1,757 \text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ , чиме се потврђује доминантни утицајни фактора рада система за грејање, независно од остварене превозне брзине и оптерећења.

Потрошња електричне енергије Е-буса која је остварена током зимског периода у смеру "Б" и спољне температуре приказана је на слици 6.38 [144].

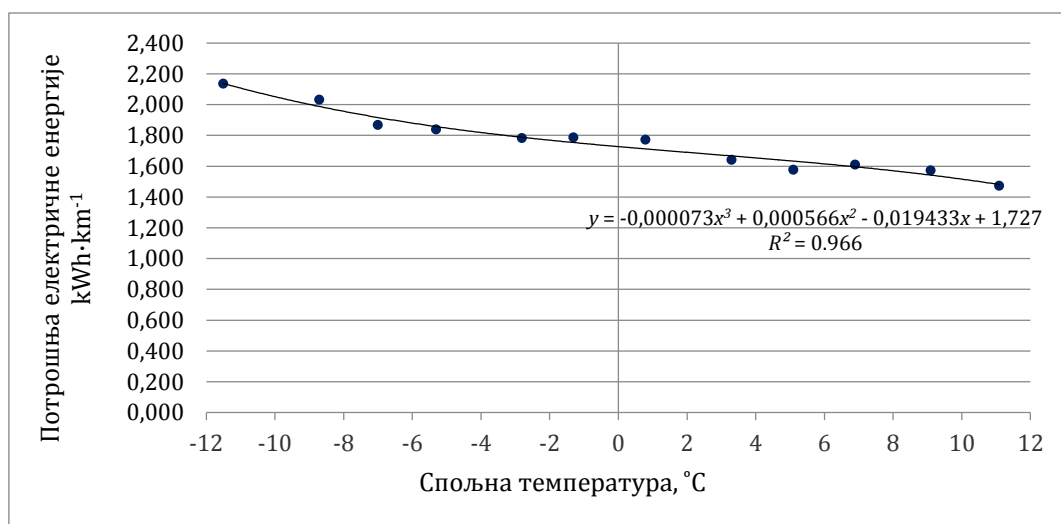


Слика 6.38 Остварене потрошње електричне енергије Е-буса и спољне температуре, смер "Б", зимски период

Расподела остварене потрошње електричне енергије Е-буса при различитим спољним температурама је приказано у табели 6.29 а на слици 6.39 приказана је функционална зависност.

Табела 6.29 Просечна потрошња електричне енергије Е-буса, за различите спољне температуре, смер "Б", зимски период

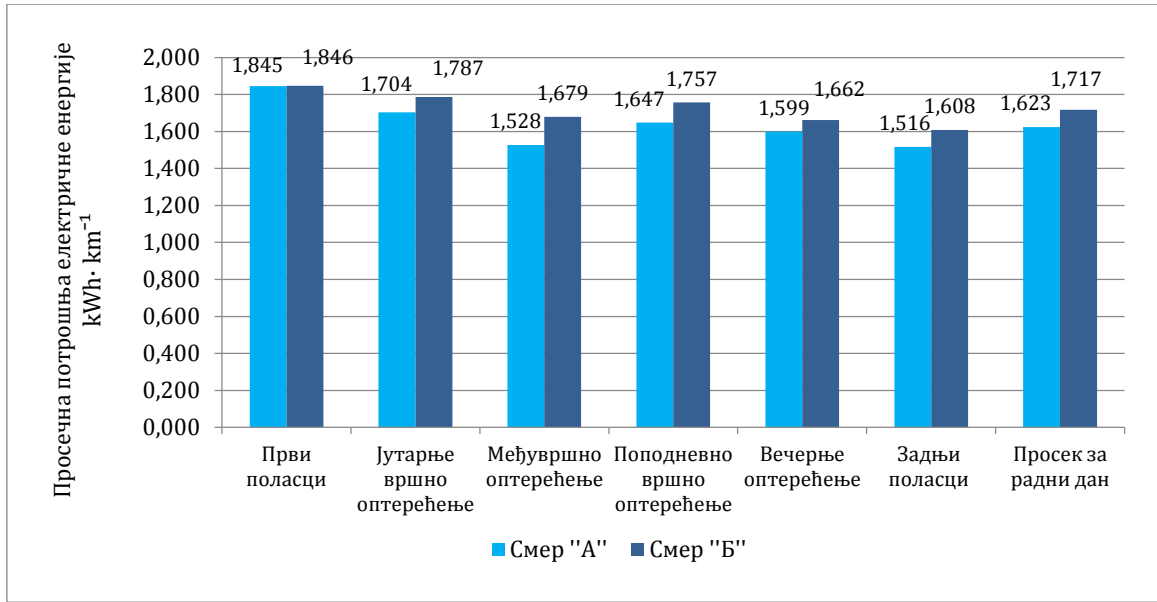
| Опсег спољне температуре<br>°C | Фреквенција | Остварена просечна потрошња<br>kWh·km <sup>-1</sup> |
|--------------------------------|-------------|---|
| -12,0 ÷ -10,0                  | 3           | 2,135   |
| -10,0 ÷ -8,0                   | 7           | 2,030   |
| -8,0 ÷ -6,0                    | 23          | 1,866   |
| -6,0 ÷ -4,0                    | 30          | 1,837   |
| -4,0 ÷ -2,0                    | 39          | 1,781   |
| -2,0 ÷ 0,0                     | 57          | 1,785   |
| 0,0 ÷ +2,0                     | 71          | 1,770   |
| 2,0 ÷ 4,0                      | 37          | 1,639   |
| 4,0 ÷ 6,0                      | 47          | 1,576   |
| 6,0 ÷ 8,0                      | 41          | 1,608   |
| 8,0 ÷ 10,0                     | 23          | 1,572   |
| 10,0 ÷ 12,0                    | 14          | 1,471   |
| <b>Укупно</b>                  | <b>392</b>  |   |



Слика 6.39 Зависност потрошње електричне енергије Е-буса и спољне температуре, смер "Б", зимски период

Зависност потрошње електричне енергије Е-буса изражене у kWh·km<sup>-1</sup> и спољне температуре изражене у °C, која је остварена у зимском периоду рада за смер "Б", описује се степеном функцијом трећег реда:  $y = -0,000073x^3 + 0,000566x^2 - 0,019433x + 1,727$  са коефицијентом корелације  $R^2=0,966$  или степеном функцијом другог реда:  $y = 0,006x^2 - 0,0259x + 1,725$  где је  $R^2=0,954$ . У зимском периоду рада Е-буса највећа потрошња електричне енергије Е-буса је при екстремно ниским температурама, које су најчешће у раним јутарњим сатима. Са порастом спољне температуре, потрошња се смањује према представљеној степеној функцији.

На слици 6.40 дат је упоредни приказ остварених просечних потрошњи електричне енергије Е-буса на линији ЕКО 1, за смер "А" и смер "Б" у посматраном зимском периоду рада.



Слика 6.40 Упоредни приказ остварених просечни потрошњи електричне енергије Е-буса, за смер "А" и смер "Б", зимски период

Разлика просечне потрошње електричне енергије нема статистички значај у поређењу између првих полазака пошто је  $|t|=0,018 < 1,96$  и задњих полазака пошто је  $|t|=1,473 < t_{0,05}^{k=29}=2,045$ . У свим другим поређењима вредност  $|t| > 1,96$  што доказује значајну статистичку разлику у потрошњи електричне енергије Е-буса.

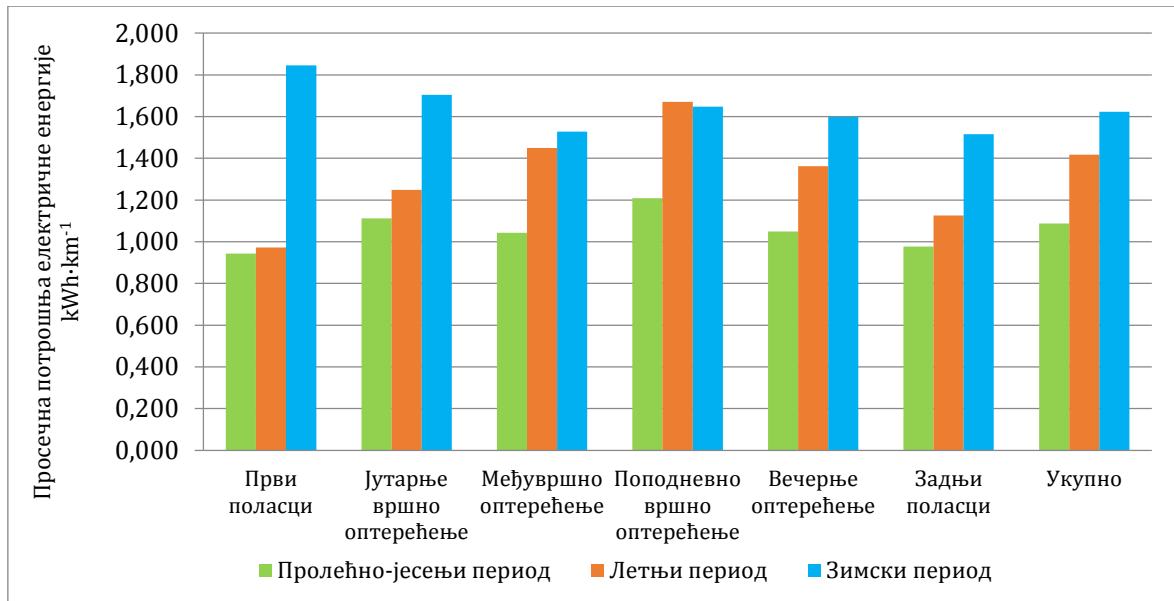
#### 6.8.4 Упоредни приказ резултата потрошње електричне енергије Е-буса на линији ЕКО 1 током пролећно-јесењег, летњег и зимског периода рада

На основу детаљне статистичке анализе потрошње електричне енергије која је урађена у тачкама 6.8.1, 6.8.2, 6.8.3, током пролећно-јесењег, летњег и зимског периода рада Е-буса Higer KLQ6125GEV3 на линији ЕКО 1, могуће је упоредити добијене резултате за смер "А" и смер "Б".

У табели 6.30 и на слици 6.41 приказани су резултати просечне потрошње електричне енергије Е-буса за смер "А".

Табела 6.30 Упоредни приказ просечне потрошње електричне енергије Е-буса, kWh·km<sup>-1</sup>, на линији ЕКО 1, током пролећно-јесењег, летњег и зимског периода рада, смер "А"

| Карактерист. период рада    | [1]  | [2]                                  | [3]                                   | [2]-[1]      | [3]-[1]      | [3]-[2]      |
|-----------------------------|--|--------------------------------------|---------------------------------------|--------------|--------------|--------------|
|                             | Пролећно-јесењи период<br>kWh·km <sup>-1</sup> | Летњи период<br>kWh·km <sup>-1</sup> | Зимски период<br>kWh·km <sup>-1</sup> |              |              |              |
| Први поласци                | 0,943  | 0,972                                | 1,845                                 | 0,029        | 0,902        | 0,873        |
| Јутарње вршно оптерећење    | 1,112  | 1,249                                | 1,704                                 | 0,137        | 0,592        | 0,455        |
| Међувршно оптерећење        | 1,043  | 1,449                                | 1,528                                 | 0,406        | 0,485        | 0,079        |
| Поподневно вршно оптерећење | 1,209  | 1,670                                | 1,647                                 | 0,461        | 0,438        | -0,023       |
| Вечерње оптерећење          | 1,049  | 1,362                                | 1,599                                 | 0,313        | 0,550        | 0,237        |
| Задњи поласци               | 0,977  | 1,126                                | 1,516                                 | 0,149        | 0,539        | 0,390        |
| <b>Укупно</b>               | <b>1,087</b>                                   | <b>1,417</b>                         | <b>1,623</b>                          | <b>0,330</b> | <b>0,536</b> | <b>0,206</b> |

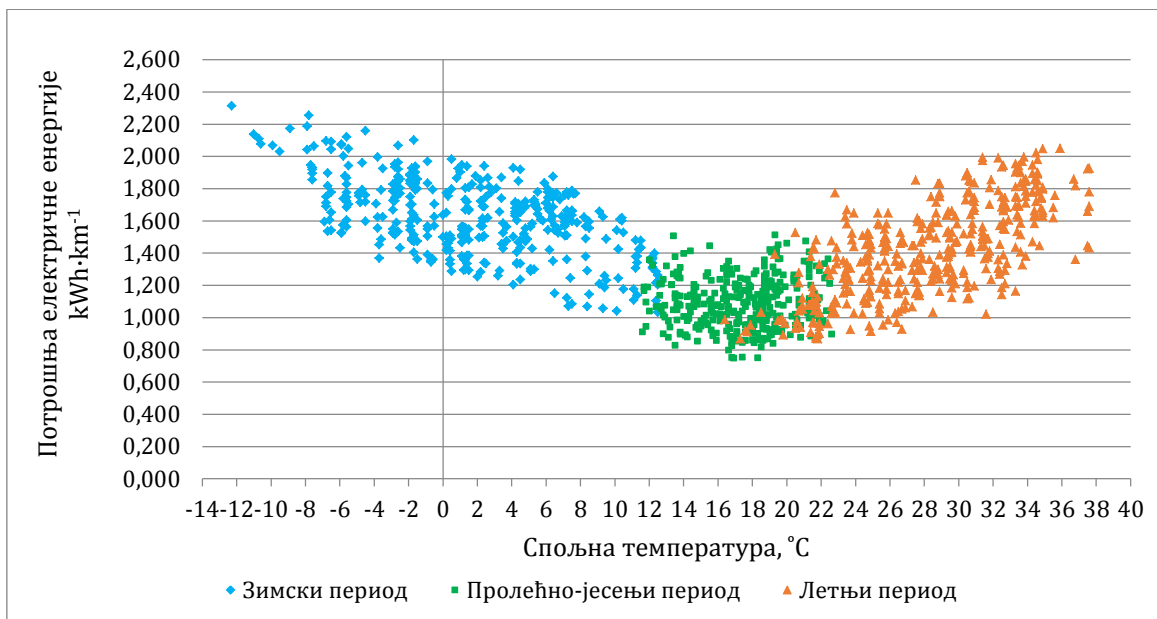


Слика 6.41 Графички приказ просечне потрошње електричне енергије Е-буса,  $kWh \cdot km^{-1}$ , на линији ЕКО 1, током пролећно-јесењег, летњег и зимског периода рада, смер "А"

Из табеле 6.30 се може закључити да током пролећно-јесењег и летњег периода рада Е-буса, разлика у просечној потрошњи електричне енергије при првим поласцима има случајни карактер пошто је  $|t|=0,843 < 1,96$ .

Разлика просечне потрошње електричне енергије има случајан карактер и у поређењу између поподневног вршног оптерећења током летњег и зимског периода  $|t|=0,748 < 1,96$ . У свим другим поређењима разлике просечних потрошњи електричне енергије имају статистички значајну разлику.

Резултати потрошње електричне енергије у смеру "А" у функцији спољне температуре током зимског, пролећно-јесењег и летњег периода приказани су на слици 6.42.



Слика 6.42 Графички приказ потрошње електричне енергије Е-буса,  $kWh \cdot km^{-1}$  на линији ЕКО 1 у функцији спољне температуре, смер "А"



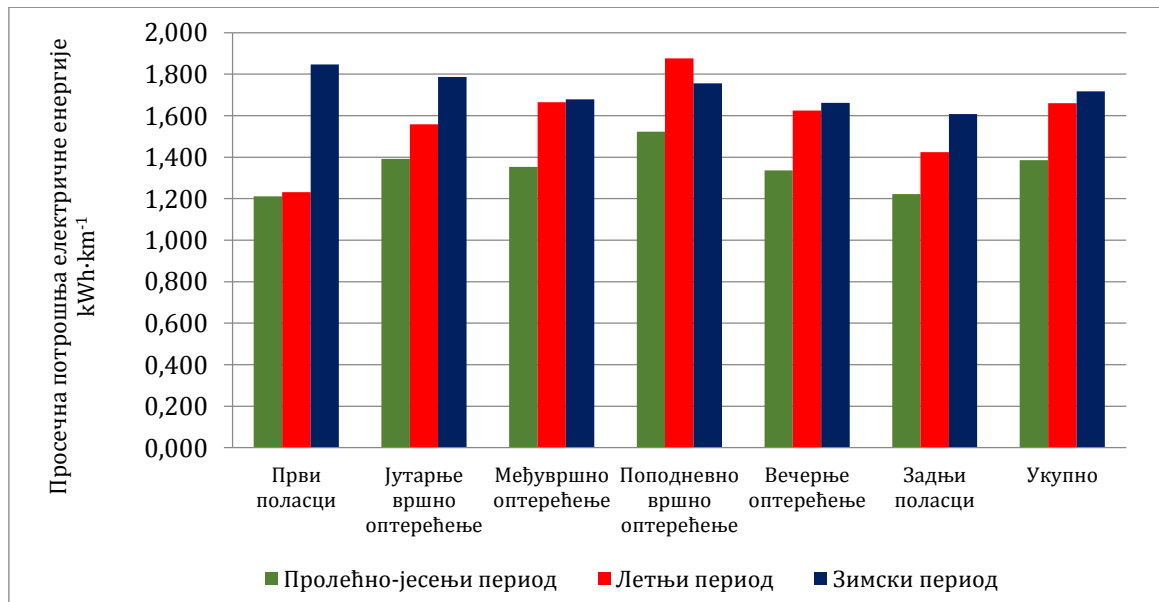
Као што је приказано у тачкама 6.8.2 и 6.8.3, потрошња електричне енергије Е-буса је у јакој корелативној вези са спољном температуром током зимског и летњег периода, што је последица рада система за грејање и хлађење возила.

Током пролећно-јесењег периода, утицај спољне температуре на потрошњу електричне енергије има случајни карактер.

У табели 6.31 и на слици 6.43 приказани су резултати просечне потрошње електричне енергије Е-буса за смер "Б".

Табела 6.31 Упоредни приказ просечне потрошње електричне енергије Е-буса,  $kWh \cdot km^{-1}$ , на линији ЕКО 1, током пролећно-јесењег, летњег и зимског периода рада, смер "Б"

| Карактер. период рада       | [4]<br>Пролећно-јесењи период<br>$kWh \cdot km^{-1}$ | [5]<br>Летњи период<br>$kWh \cdot km^{-1}$ | [6]<br>Зимски период<br>$kWh \cdot km^{-1}$ | [5]-[4]<br>$kWh \cdot km^{-1}$ | [6]-[4]<br>$kWh \cdot km^{-1}$ | [6]-[5]<br>$kWh \cdot km^{-1}$ |
|-----------------------------|--|--|---|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Први поласци                | 1,212  | 1,232                                      | 1,846                                       | 0,020                          | 0,635                          | 0,615                          |
| Јутарње вршно оптерећење    | 1,393  | 1,558                                      | 1,787                                       | 0,166                          | 0,394                          | 0,228                          |
| Међувршно оптерећење        | 1,354  | 1,665                                      | 1,679                                       | 0,311                          | 0,325                          | 0,014                          |
| Поподневно вршно оптерећење | 1,523  | 1,877                                      | 1,757                                       | 0,354                          | 0,234                          | -0,120                         |
| Вечерње оптерећење          | 1,337  | 1,626                                      | 1,662                                       | 0,289                          | 0,325                          | 0,036                          |
| Задњи поласци               | 1,223  | 1,424                                      | 1,608                                       | 0,201                          | 0,385                          | 0,184                          |
| <b>Укупно</b>               | <b>1,386</b>   | <b>1,661</b>                               | <b>1,717</b>                                | <b>0,275</b>                   | <b>0,331</b>                   | <b>0,056</b>                   |

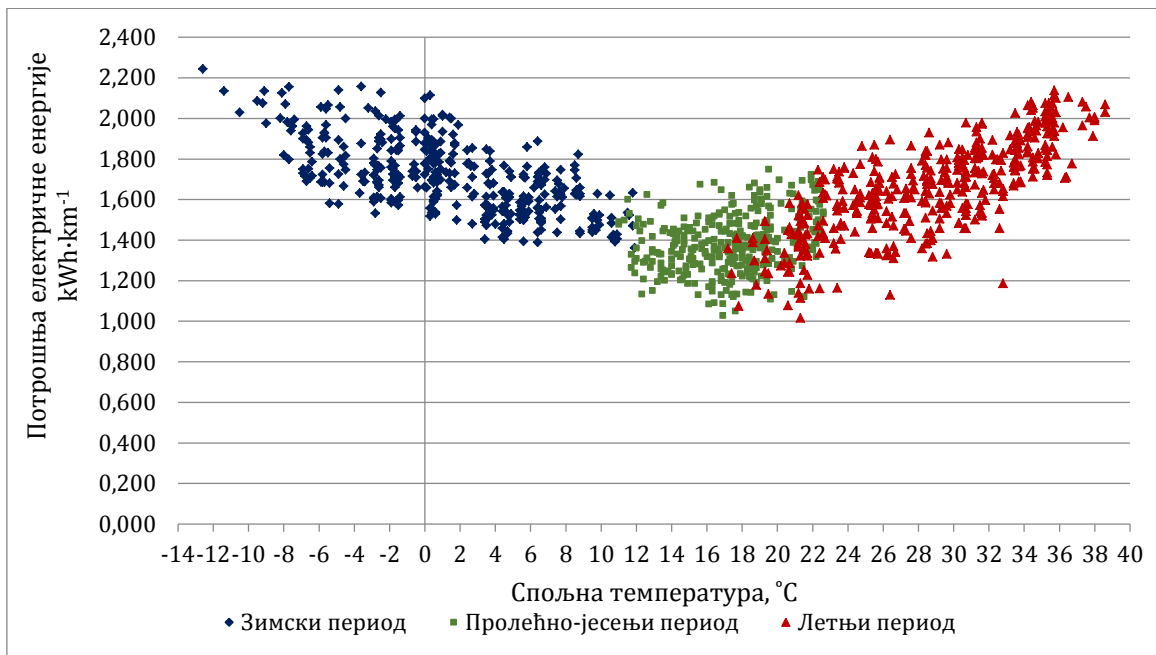


Слика 6.43 Графички приказ просечне потрошње електричне енергије Е-буса,  $kWh \cdot km^{-1}$ , на линији ЕКО 1, током пролећно-јесењег, летњег и зимског периода рада, смер "Б"

Из табеле 6.31 се може закључити да као и случају за смер "А", током пролећно-јесењег и летњег периода рада Е-буса, разлика просечне потрошње електричне енергије при првим поласцима у смеру "Б" има случајни карактер што се доказује тестом  $|t|=0,626 < 1,96$ .

Разлика просечне потрошње електричне енергије има случајан карактер у поређењу између међувршног оптерећења током летњег и зимског периода  $|t|=0,599 < 1,96$  и вечерњег оптерећења  $|t|=1,428 < 1,96$ . У свим осталим поређењима разлике просечних потрошњи електричне енергије имају статистички значајну разлику.

Резултати потрошње електричне енергије у смеру "Б" у функцији спољне температуре током зимског, пролећно-јесењег и летњег периода приказани су на слици 6.44.



Слика 6.44 Графички приказ потрошње електричне енергије Е-буса,  $kWh \cdot km^{-1}$ , на линији ЕКО 1 у функцији спољне температуре, смер "Б"

У смеру "Б" потрошња електричне енергије Е-буса је у јакој корелативној вези са спољном температуром током зимског и летњег периода, што је последица рада система за грејање и хлађење возила, као што је приказано у тачкама 6.8.2 и 6.8.3. Током пролећно-јесењег периода, утицај спољне температуре на потрошњу електричне енергије има случајни карактер.

У табели 6.32 дат је приказ просечне вредности потрошње електричне енергије Е-буса за сваки период рада током године.

Табела 6.32 Упоредни приказ просечне потрошње електричне енергије по периодима експлоатације Е-буса на линији ЕКО 1

| Период експлоатације            | Смер "А"<br>$kWh \cdot km^{-1}$ | Смер "Б"<br>$kWh \cdot km^{-1}$ | Просек по периоду<br>$kWh \cdot km^{-1}$ |
|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--|
| Пролећно-јесењи период          | 1,087                           | 1,386                           | 1,237                                    |
| Летњи период                    | 1,417                           | 1,661                           | 1,539                                    |
| Зимски период                   | 1,623                           | 1,717                           | 1,670                                    |
| <b>Просек на годишњем нивоу</b> | <b>1,393</b>                    | <b>1,593</b>                    | <b>1,493</b>                             |

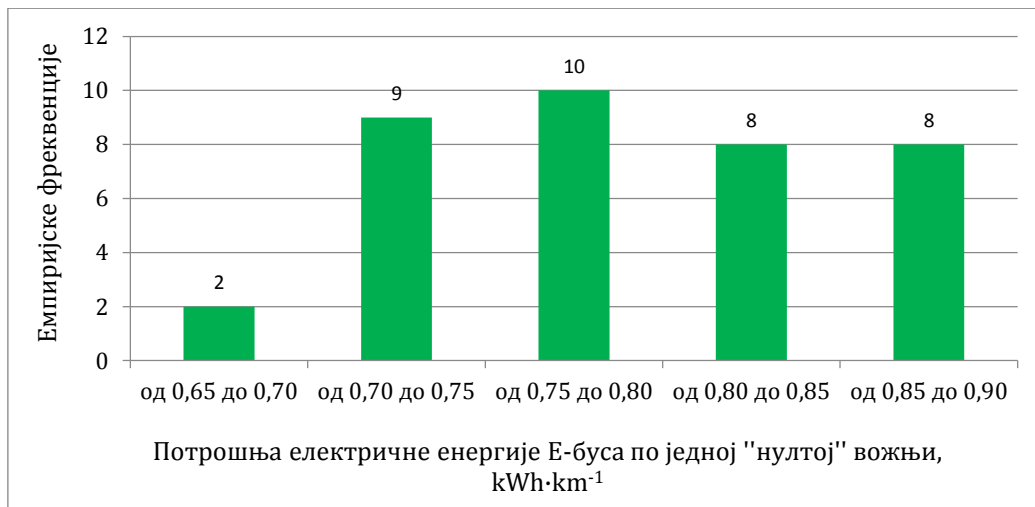
Ако се усвоји да зимски период експлоатације траје 5 месеци, пролећно-јесењи 4 месеца и летњи 3 месеца, проистиче да на годишњем нивоу просечна потрошња електричне енергије Е-буса на линији ЕКО 1 износи око  $1,493 \text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ .

### 6.8.5 Утицај стила возње на потрошњу електричне енергије Е-буса

Начин возње аутобуса на електрични погон од стране возача представља утицајни фактор на потрошњу електричне енергије Е-буса који је недовољно истражен у претходном периоду, с обзиром да су аутобуси на електрични погон присутни у већем броју тек задњих 5 година.

Да би се истражило да ли начин возње Е-буса има утицај на потрошњу електричне енергије Е-буса урађена је анализа "нултих" возњи Е-буса. "Нулта" возња се остварује на почетку и крају радног дана, када се Е-бус креће из депоа (гараже) до почетне станице линије тј. терминуса или обрнуто, без стајања на станицама и без путника. На примеру "нулте" возње од депоа на локацији Дорћол до терминуса Белвил, дужине  $7,00 \text{ km}$ , које су остварене у раним јутарњим сатима између 04:30 и 05:00, мерена је потрошња електричне енергије и остварено време возње.

Анализиран је узорак од 37 мерења који је остварен у периоду од 29.05.2019. до 10.09.2019. године [140]. На слици 6.45 приказана је расподела узорка од 37 мерења потрошње електричне енергије Е-буса које су остварене током "нултих" возњи на релацији Дорћол-Белвил од стране 8 возача.



Слика 6.45 Расподела потрошње електричне енергије Е-буса, "нулта возња", релација "Дорћол"- Насеље Белвил

Средња вредност потрошње електричне енергије Е-буса износи  $0,792 \text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$  и стандардно одступање  $0,063 \text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ . Средње време возње је 16 минута и 48 секунди (00:16:48) са стандардним одступањем 1 минут и 28 секунди (00:01:28).

Најмања вредност остварене потрошње електричне енергије Е-буса је  $0,690 \text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$  а највећа  $0,895 \text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ , што чини разлику од 29,7%.

Ако се из узорка од 37 мерења издвоје два нова узорка, први од 11 мерења где су остварене најмање потрошње електричне енергије Е-буса:  $X_1=0,717 \text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ ,  $s_1=0,0186 \text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ ,  $n_1=11$  и други од 8 мерења где су остварене највеће потрошње:  $X_2=0,879 \text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ ,  $s_2=0,0151 \text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ ,  $n_2=8$ , коришћењем теста једнакости

средњих вредности (Студентов тест) вредност променљиве  $|t|=20,216$  има вишеструко већу вредност од граничне вредности  $t_{0,05}^{k=17}=2,110$ , чиме се доказује значајна статистичка разлика остварених средњих (просечни) потрошњи електричне енергије. Процентуална разлика остварених средњих потрошњи издвојених узорака је 22,6%.

Добијени резултати потрошње електричне енергије при "нултим" вожњама представљају случајеве потрошње електричне енергије Е-буса, без оптерећења, без утицаја рада система за грејање-хлађење и са минималним утицајем саобраћајног тока. Разлике у потрошњи су последица стила вожње у фази убрзавања, кретања по инерцији и кочења возила и умећа возача да деоницу од депоа до почетне станице (терминуса) пређе са што мање заустављања пре свега на семафорисаним раскрсницама, чиме се потврђује део *Хипотезе 3* да на потрошњу електричне енергије Е-буса утиче стил вожње.

Приказани резултати утицаја стила вожње на потрошњу електричне енергије Е-буса представљају почетно истраживање и ограничени су само на "нулте" вожње. У реалној експлоатацији на линији ЕКО 1 претпоставка је да је овај утицај присутан и искључиво зависи од индивидуалних способности возача и утицаја фактора густине саобраћајног тока и тока путника на линији ЕКО 1. Истраживање стила вожње на потрошњу електричне енергије у реалним условима рада Е-буса, са препорукама енергетски ефикасне вожње и обуком која ће обухватити све возаче који управљају аутобусима на електрични погон један су од будућих праваца истраживања којима треба дати на значају.

На почетку 2020. године урађено је прво детаљније истраживање утицаја стила вожње на енергетску ефикасност Е-буса [53]. Испитивање утицаја стила вожње на линији ЕКО 1 у периоду међувршног оптерећења (од 10:00 до 12:50) у условима средње оптерећености са бројем путника на линији и очекиваним временом превоза карактеристичним за тај период рада Е-буса показао је значајне разлике у енергетској ефикасности Е-буса када је возач возио према упутствима енергетски ефикасне вожње и када је возио "агресивним" стилем, који је подразумевао нагла убрзавања и краткотрајна интензивна кочења. У смеру "А" потрошња електричне енергије била је за 31,1% мања када је возач вози према упутству енергетски ефикасне вожње у односу на "агресиван" стил вожње док је у смеру "Б" та разлика била још израженија и износила је 35,2%.

## 7. РЕКУПЕРАЦИЈА ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ АУТОБУСА НА ЕЛЕКТРИЧНИ ПОГОН

Једна од најважнијих карактеристика аутобуса на електрични погон јесте способност рекуперације (recovery) електричне енергије која настаје у фази кочења и успоравања возила. Специфичности експлоатације аутобуса у градском превозу огледа се у динамичком режиму рада возила, посебно са аспекта учесталости и интензитета убрзавања и кочења, честог стајања, малих превозних брзина, итд. С обзиром на веома честа кочења која се том приликом реализују, јавља се могућност повраћаја-рекуперације дела кинетичке енергије возила у електричну, што ова возила чини још енергетски конкурентнијим у поређењу са аутобусима који имају СУС моторе са погоном на дизел гориво или КПГ. У фази кочења аутобуса на електрични погон, погонски електромотор прелази у генераторски режим рада. Тако се генерисана електрична енергија враћа у систем за складиштење енергије. Захваљујући томе повећава се аутономија кретања коју може да оствари возило.

Остварена рекуперација електричне енергије код Е-буса у фази кочења и успорења одређена је перформансама погонског електромотора, избором стратегије (алгорита) управљања регенеративним кочењем, режимом вожње, конфигурацијом терена, способношћу батерије/суперкондензатора да прими одређену количину електричне енергије и стилем вожње возача.

Према препорукама произвођача возила Хигер (Higer) [53,85] за аутобус на електрични погон KLQ6125GEV3, највећа рекуперација електричне енергије у фази кочења и енергетска ефикасност постиже се:

- при кретању Е-буса брзинама од  $30 \div 35 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,
- када погонски електромотор ради са највећом ефикасношћу, при бројевима обртаја погонског електромотора изнад  $2000 \text{ min}^{-1}$ ,
- када је команда радне кочнице притиснута до 28% хода педале, када је оптимална рекуперација, што одговара углу притиснутости команде кочнице од  $9^\circ$  (максимални угао је  $32^\circ$ ),
- када се врши успорење Е-буса по инерцији (педала радне кочнице није активирана) регенеративни кочни момент који остварује електромотор је константан и износи 34 Nm и делује на точкове погонске осовине,
- при кочењу Е-буса када брзина возила падне испод  $5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ , престаје дејство регенеративног кочења,
- у случајевима када је радна кочница притиснута више од 28% хода педале постоји истовремено деловање регенеративног кочења на точкове погонске осовине и пнеуматског система возила који делује на точкове управљачке и погонске осовине. У овом случају умањена је ефикасност регенеративног кочења,
- при кретању на низбрдици препоручује се благи притисак на педалу радне кочнице како би се активирало регенеративно кочење, а возилу одржавала константна брзина кретања, чиме се постиже најбољи ефекат рекуперације електричне енергије.

Укупна активна електрична снага аутобуса на електрични погон у фази убрзавања или кретања константном брзином једнака је збиру свих снага приказаних једначином:

$$P_{ebus} = P_{uc} = (P_{emM} + P_{gem} + P_{pu} + P_{gtr} + P_{ac} + P_h + P_{gbk}), \quad (7.1)$$

где је:

- $P_{ebus}$  - укупна активна електрична снага Е-буса, W,
- $P_{uc}$  - укупна активна електрична снага суперкондензатора, W,
- $P_{emM}$  - излазна снага погонског електромотора, W,
- $P_{gem}$  - снага електричних губитака у електромотору и инвертору Е-буса, W,
- $P_{pu}$  - активна електрична снага помоћних уређаја на Е-бус, W,
- $P_{gtr}$  - снага губитака у трансмисији, W,
- $P_{ac}$  - активна електрична снага система за хлађење Е-буса, W,
- $P_h$  - активна електрична снага система за грејање Е-буса, W,
- $P_{gbk}$  - снага електричних губитака у суперкондензатору или батерији и кабловима Е-буса ( 2÷3% од укупне активне електричне снаге потрошача), W.

У посматраном временском интервалу на основу једначине 7.1 укупна преузета електрична енергија аутобуса на електрични погон из суперкондензатора или батерије исказана у kWh, одређена је интегралом:

$$E_{puc} = \frac{1}{3600000} \int_{t_1}^{t_2} (P_{emM} + P_{gem} + P_{pu} + P_{gtr} + P_{ac} + P_h + P_{gbk}) \cdot dt, \quad (7.2)$$

где је:

- $E_{puc}$  - преузета електрична енергија из суперкондензатора или батерије у режиму убрзања, kWh,

Током регенеративног кочења Е-буса у посматраном временском интервалу електрична енергија која је враћена у суперкондензатор или батерију приказана је интегралом:

$$E_{ruc} = \frac{1}{3600000} \int_{t_1}^{t_2} (P_{emg} - P_{gemr} - P_{pu} - P_{ac} - P_h - P_{gbk}) \cdot dt, \quad (7.3)$$

где је:

- $E_{ruc}$  - враћена електрична енергија у суперкондензатор или батерију, kWh,
- $P_{emg}$  - снага електромотора у режиму генератора, W,
- $P_{gemr}$  - снага електричних губитака у електромотору и инвертору у режиму генератора, W.

Разлика између преузете електричне енергије из суперкондензатора или батерије и електричне енергије враћене у суперкондензатор у посматраном периоду представља укупну потрошену електричну енергију аутобуса на електрични погон и приказана је једначинама:

$$\Delta E_{uc} = E_{puc} - E_{ruc}, \quad (7.4)$$

$$\Delta E_{uc} = E_{ebus}, \quad (7.5)$$

где је:

- $\Delta E_{uc}$  - разлика преузете и враћене електричне енергије суперкондензатора, kWh,
- $E_{ebus}$  - укупно потрошена електрична енергија Е-буса, kWh. Однос генерисане електричне енергије система електромотор-инвертор у режиму генератора (енергија рекуперације), што је приказано у једначини 5.40 и укупно потрошене

електричне енергије система електромотор-инвертор у моторском режиму рада (једначина 5.27) у посматраном периоду представља коефицијент рекупериције:

$$\lambda_{rec} = \frac{E_{emr}}{E_{em}} \cdot 100, \quad (7.6)$$

где је:

$E_{emr}$  - електрична енергија рекупериције система електромотор-инвертор, режим генератора,

$E_{em}$  - утрошена електрична енергија система електромотор-инвертор моторски режим,

$\lambda_{rec}$  - коефицијент рекупериције, %.

Ефикасност регенеративног кочења (ефикасност рекупериције) се исказује коефицијентом ефикасности рекупериције као однос електричне енергије која је враћена у суперкондензатор или батерију (једначина 7.3) и електричне енергије преузете из суперкондензатора, односно батерије (једначина 7.2) у посматраном временском периоду и представљено је изразом:

$$\lambda_{uc} = \frac{E_{ruc}}{E_{puc}} \cdot 100, \quad (7.7)$$

где је:

$\lambda_{uc}$  - коефицијент ефикасности рекупериције, %.

При чему је  $\lambda_{rec} > \lambda_{uc}$ . Коефицијент рекупериције, ако се анализира само фаза кочења, што је чест случај у испитивањима на полигону, може се исказати и као однос енергије (електричне) која је генерисана у електромотору током генераторског режима и кинетичке енергије које је аутобус на електрични погон имао на почетку фазе кочења у посматраном временском интервалу, како је приказано у једначини:

$$\lambda_{rec_{kin}} = \frac{E_{emr}}{E_{bus_{kin}}} \cdot 100, \quad (7.8)$$

где је:

$\lambda_{rec_{kin}}$  - коефицијент рекупериције у односу на кинетичку енергију Е-буса у фази кочења, %,

$E_{bus_{kin}}$  - кинетичка енергија Е-буса у фази кочења.

Слично претходном изразу, коефицијент ефикасности регенеративног кочења у односу на кинетичку енергију коју је возило имало на почетку кочења може се дефинисати:

$$\lambda_{uc_{kin}} = \frac{E_{ruc}}{E_{bus_{kin}}} \cdot 100, \quad (7.9)$$

где је:

$\lambda_{uc_{kin}}$  - коефицијент ефикасности рекупериције у односу на кинетичку енергију Е-буса у фази кочења, %.

Ако се рад аутобуса на електрични погон посматра на линији јавног градског транспорта, потрошња електричне енергије Е-буса се приказује посебно по оствареним вожњама за смер "А" и смер "Б", што је приказано једначином:

$$E_{ebus_{ABmn}} = E_{ebus_{Am}} + E_{ebus_{Bn}}, \quad (7.10)$$

где је:

$E_{ebus_{ABmn}}$  - потрошена електрична енергија Е-буса, збир смер "А+Б",

$E_{ebus_{Am}}$  - потрошена електрична енергија Е-буса за смер "А",

$E_{ebus_{Bn}}$  - потрошена електрична енергија Е-буса за смер "Б",

$m$  - број вожње у смеру "А",

$n$  - број вожње у смеру "Б".

Како је потрошена електрична енергија Е-буса једнака разлици између преузете електричне енергије из суперкондензатора и враћене електричне енергије у суперкондензатор или батерију, што је приказано у једначинама 7.4 и 7.5, за смер "А" и смер "Б" важи:

$$\Delta E_{uc_{Am}} = E_{p_{uc_{Am}}} - E_{r_{uc_{Am}}}, \quad (7.11)$$

$$\Delta E_{uc_{Bn}} = E_{p_{uc_{Bn}}} - E_{r_{uc_{Bn}}}, \quad (7.12)$$

где је:

$\Delta E_{uc_{Am}}$  - разлика преузете и враћене електричне енергије суперкондензатора, смер "А", kWh,

$E_{p_{uc_{Am}}}$  - преузета електрична енергија из суперкондензатора, смер "А", kWh,

$E_{r_{uc_{Am}}}$  - враћена електрична енергија у суперкондензатор, смер "А", kWh,

$\Delta E_{uc_{Bn}}$  - разлика преузете и враћене електричне енергије суперкондензатора, смер "Б", kWh,

$E_{p_{uc_{Bn}}}$  - преузета електрична енергија из суперкондензатора, смер "Б", kWh,

$E_{r_{uc_{Bn}}}$  - враћена електрична енергија у суперкондензатор, смер "Б", kWh.

Ако се разлика преузете и враћене електричне енергије у суперкондензатор или батерију посматра по смеровима кретања Е-буса и подели са дужином линије у смеру "А" и смеру "Б", добија се релативни показатељ просечне потрошње електричне енергије Е-буса по пређеном километру посматрано по смеровима:

$$E_{ebus_{LAm}} = \frac{\Delta E_{uc_{Am}}}{L_A}, \quad (7.13)$$

$$E_{ebus_{LBn}} = \frac{\Delta E_{uc_{Bn}}}{L_B}, \quad (7.14)$$

где је:

$E_{ebus_{LAm}}$  - просечна потрошња Е-буса за остварену вожњу, смер "А", kWh·km<sup>-1</sup>,

$E_{ebus_{LBn}}$  - просечна потрошња Е-буса за остварену вожњу, смер "Б", kWh·km<sup>-1</sup>.

У фази пуњења Е-буса настају електрични губици у пуњачу и у току преноса електричне енергије од пуњача до суперкондензатора или батерије. Ти губици се дефинишу коефицијентом ефикасности пуњача, тако да се просечна потрошња електричне енергије Е-буса, када се узму у обзир и ови губици, може представити:



$$E'_{ebusLA_m} = \frac{E_{ebusLA_m}}{\eta_{ch}}, \quad (7.15)$$

$$E'_{ebusLB_n} = \frac{E_{ebusLB_n}}{\eta_{ch}}, \quad (7.16)$$

где је:

$E'_{ebusLA_m}$  - просечна потрошња Е-буса за остварену вожњу у смеру "А",  
са губицима пуњења, kWh·km<sup>-1</sup>,

$E'_{ebusLB_n}$  - просечна потрошња Е-буса за остварену вожњу у смеру "Б",  
са губицима пуњења, kWh·km<sup>-1</sup>,

$\eta_{ch}$  - коефицијент ефикасности пуњача (~0,95).

Ако тренутну вредност напона и струје пражњења посматрамо у временском интервалу од  $t_p$  до  $t_q$ , њихов међусобни производ представља остварени електрични рад, односно преузету електричну енергију из суперкондензатора.

Сума свих парцијалних производа струје пражњења и напона остварених у временским интервалима представља укупну преузету електричну енергију из суперкондензатора за једну вожњу у смеру "А" и представљена је изразом:

$$E_{pucA} = \sum_{s=1}^m \frac{\int_{t_{ps}}^{t_{ks}} U_{uc} \cdot I_{puc} \cdot dt}{3600000}, \quad (7.17)$$

где је:

$E_{pucA}$  - укупно преузета електрична енергија из суперкондензатора, kWh,

$U_{uc}$  - тренутни напон суперкондензатора, V,

$I_{puc}$  - тренутна јачина струје пражњења суперкондензатора, A,

$t_{ps}$  - почетак временског интервала, s,

$t_{ks}$  - крај временског интервала, s,

$m$  - број временских интервала пражњења суперкондензатора.

Ако се посматрају тренутне вредности напона и струје пуњења у временском интервалу од  $t_{pr}$  до  $t_{kr}$ , њихов међусобни производ представља враћену електричну енергију у суперкондензатор.

Сума свих парцијалних производа струје пуњења и напона остварених у временским интервалима представља укупну враћену електричну енергију у суперкондензатор за смер "А", и представљена је изразом:

$$E_{rucA} = \sum_{s=1}^p \frac{\int_{t_{prs}}^{t_{krs}} U_{uc} \cdot I_{ruc} \cdot dt}{3600000}, \quad (7.18)$$

где је:

$E_{rucA}$  - укупно враћена електрична енергија у суперкондензатор, kWh,

$U_{uc}$  - тренутни напон суперкондензатора, V,

$I_{ruc}$  - тренутна јачина струје која се враћа у суперкондензатор, A,

$t_{prs}$  - почетак временског интервала, s,

$t_{krs}$  - крај временског интервала, s,  
 $p$  - број временских интервала пуњења суперкондензатора.

На исти начин добијене су вредности потрошене и електричне енергије рекуперације система електромотор-инвертор. У погонском режиму рада (моторски режим) укупно потрошена електрична енергија у смеру "А" је:

$$E_{em_A} = \sum_{s=1}^n \frac{\int_{t_{pms}}^{t_{kms}} U_t \cdot I_t \cdot dt}{3600000}, \quad (7.19)$$

где је:

$E_{em_A}$  - укупно потрошена електрична енергија електромотора-инвертора, моторни режим, kWh,

$U_t$  - тренутни напон електромотора-инвертора, V,

$I_t$  - тренутна јачина струје електромотора-инвертора, A,

$t_{pms}$  - почетак временског интервала, s,

$t_{kms}$  - крај временског интервала, s,

$n$  - број временских интервала потрошње електромотора-инвертора.

У режиму регенеративног кочења Е-буса, када електромотор ради као генератор, укупна електрична енергија рекуперације је:

$$E_{emr_A} = \sum_{s=1}^q \frac{\int_{t_{prrs}}^{t_{krss}} U_{tr} \cdot I_{tr} \cdot dt}{3600000}, \quad (7.20)$$

где је:

$E_{emr_A}$  - укупна електрична енергија рекуперације система електромотор-инвертор, kWh,

$U_{tr}$  - тренутни напон електромотора-инвертора, V,

$I_{tr}$  - тренутна јачина струје рекуперације електромотора-инвертора, A,

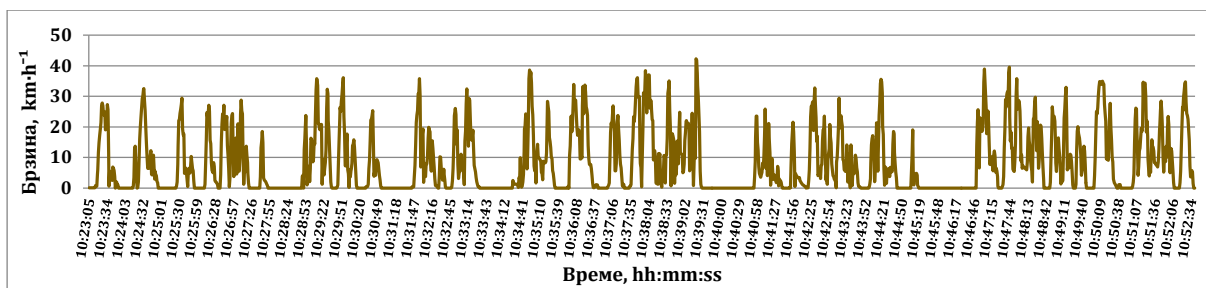
$t_{prrs}$  - почетак временског интервала, s,

$t_{krss}$  - крај временског интервала, s,

$q$  - број временских интервала рекуперације електромотора-инвертора.

## 7.1 Мерење рекуперације и потрошње електричне енергије на линији ЕКО 1

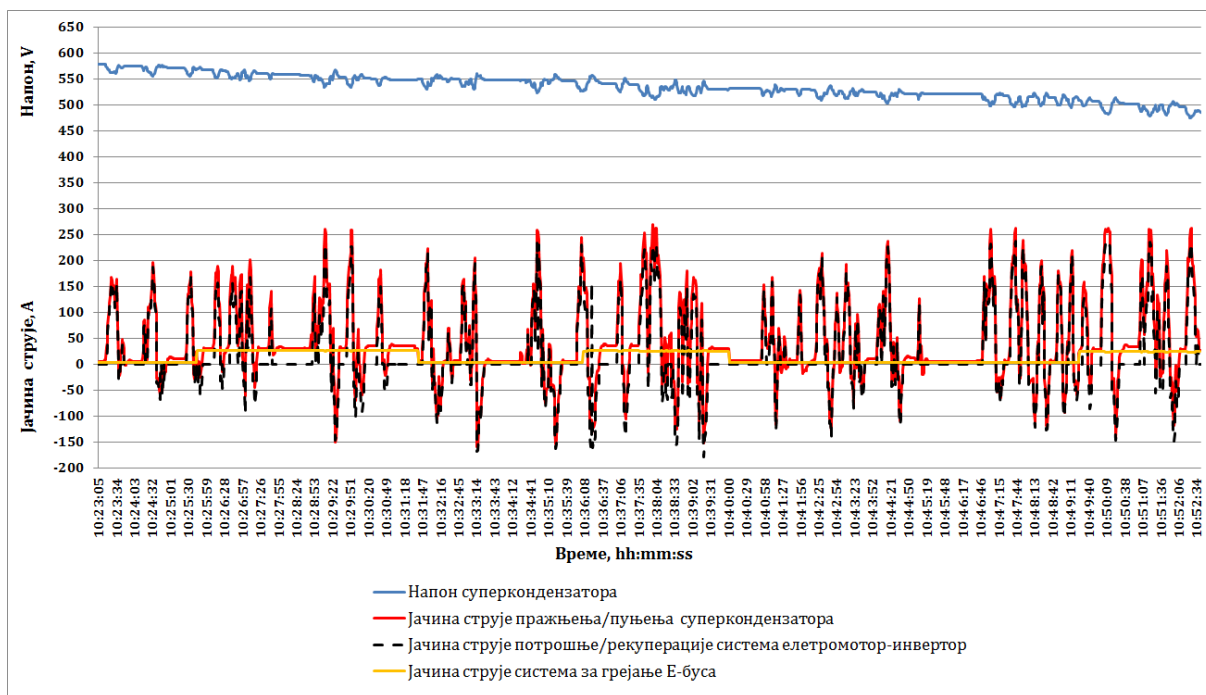
Мерење рекуперације и потрошње електричне енергије на Е-бусу Niger KLQ6125GEV3 г.б. 2103, рађено је 2. марта 2018. године заједно са истраживањем утицаја рада система за грејање на потрошњу електричне енергије Е-буса [64]. Мерење је спроведено у периоду међувршног оптерећења у периоду 10:23:05÷10:52:40 часова у смеру "А". Е-бус је током трајања вожње био са малом попуњености путника. Максимални број путника у возилу био је на међустаничном растојању од Бранковог моста до Блока 21 и износио је 28. Саобраћајни услови били су повољни, без застоја и гужви. Временски услови били су типично зимски са спољном температуром од -1°C и мокрим коловозом. На слици 7.1 дат је приказ реализованог возног циклуса Е-буса током мерења.



Слика 7.1 Тренутне вредности брзине кретања Е-буса, г.б.2103, у периоду 10:23:05÷10:52:40, смер "А", 2. март 2018. године

Остварена је максимална брзина од  $42,3 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  на деоници преко Бранковог моста. С обзиром на влажно стање коловоза, остварене брзине на осталим деоницама су биле испод  $40 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ .

Тренутне вредности напона на суперкондензатору и јачине струје пражњења/пуњења суперкондензатора, јачине струје потрошње/рекуперације система електромотор-инвертор и јачине струје потрошње система за грејање путничког и возачког простора, током вожње у смеру "А" (Вуков споменик-Насеље Белвил) измерене су помоћу мерне опреме: Флуке (Fluke 289), струјних клешта (Fluke 1010) и уређаја (Fluke 190-204 Score meter). Приказ позиција мерних уређаја Fluke 289 и њихових карактеристика дат је у Прилогу 3. Тренутне вредности напона и јачине струје на суперкондензатору, инвертору и систему за грејање приказани су на слици 7.2.



Слика 7.2 Тренутне вредности напона и јачине струје на суперкондензатору, инвертору и систему за грејање Е-буса у периоду 10:23:05÷10:52:40 часова, смер "А", 2. март 2018. године

Вредност напона суперкондензатора опадала је са  $578,3 \text{ V}$  на почетку мерења, до  $488,2 \text{ V}$  на крају мерења. Максимална јачина струје пражњења из суперкондензатора износила  $268,1 \text{ A}$ , док је максимална јачина струје која је враћена у суперкондензатор  $158,2 \text{ A}$ . На инвертору електромотора измерена је

максимална јачина струје потрошње од 237,1 А, док је максимална јачина струје рекуперације износила 178,1 А. Систем за грејање путничког простора Сферос (Sferos) и ветробранског стакла, који је био у раду све време током теста, остварио је максималну јачину струје потрошње од 27,7 А.

Приказ резултата мерења на Е-бусу Niger KLQ6125GEV3 г.б. 2103, које је рађено је 2. марта 2018. године, смер "А" у периоду 10:23:05÷10:52:40 часова, приказан је у табели 7.1.

Табела 7.1 Резултати мерења Е-бус, г.б 2103, смер "А", 10:23:05÷10:52:40 часова, 2. март 2018. године

| Линија ЕКО 1 , Смер "А", параметар                               | Ознака, јединица                     | Резултат |
|--|--------------------------------------|----------|
| Дужина трасе   | $L_A$ , km                           | 7,47     |
| Време почетка вожње  | hh:mm:ss                             | 10:23:05 |
| Време завршетка вожње  | hh:mm:ss                             | 10:52:40 |
| Време превоза  | $T_{pA}$ , hh:mm:ss                  | 0:29:35  |
| Превозна брзина  | $V_{pA}$ , km·h <sup>-1</sup>        | 15,14    |
| Спољна температура   | $T_{spo}$ , °C                       | -1       |
| <b>Суперкондензатор:</b>   |                                      |          |
| Преузета енергија  | $E_{pucA}$ , kWh                     | 13,241   |
| Враћена енергија   | $E_{rucA}$ , kWh                     | 1,992    |
| Разлика енергија   | $\Delta E_{ucA}$ , kWh               | 11,249   |
| Коефицијент ефикасности рекуперације                             | $\lambda_{ucA}$ , %                  | 15,04    |
| Просечна потрошња електричне енергије Е-буса                     | $E_{ebusLA}$ , kWh·km <sup>-1</sup>  | 1,506    |
| Просечна потрошња електричне енергије Е-буса, са губицима пуњача | $E'_{ebusLA}$ , kWh·km <sup>-1</sup> | 1,585    |
| <b>Погонски систем (Електромотори-инвертори)</b>                 |                                      |          |
| Потрошена енергија   | $E_{emA}$ , kWh                      | 9,090    |
| Енергија рекуперације  | $E_{emrA}$ , kWh                     | 3,012    |
| Разлика енергија   | $\Delta E_{emA}$ , kWh               | 6,078    |
| Коефицијент рекуперације   | $\lambda_{recA}$ , %                 | 33,13    |
| Потрошена електрична енергија система за грејање возила          | $E_{hA}$ , kWh                       | 3,569    |
| Потрошена електрична енергија за рад помоћних уређаја            | $E_{puA}$ , kWh                      | 1,602    |

На основу једначина 7.17 и 7.18, укупно преузета електрична енергија из суперкондензатора је 13,241 kWh док је враћено 1,992 kWh. Разлика ових енергија је 11,249 kWh што представља потрошену електричну енергију Е-буса. Остварена је просечна потрошња Е-буса од 1,506 kWh·km<sup>-1</sup>. Коефицијент ефикасности рекуперације је 15,04%. Погонски систем (електромотори-инвертори) потрошио је укупно 9,090 kWh електричне енергије (једначина 7.19), док енергија рекуперације која је генерисана у генераторском режиму током регенеративног кочења Е-буса износи 3,012 kWh (једначина 7.20). Остварен је коефицијент рекуперације од 33,13%. Систем за грејање Е-буса остварио је потрошњу од 3,569 kWh електричне енергије. Из табеле 7.1 се види да је електрична енергија рекуперације генерисана у погонским електромоторима, која је предата инверторима, увек већа него на суперкондензатору. У наведеном примеру она је већа за 1,02 kWh. Разлика електричне енергије рекуперације између инвертора и суперкондензатора представља пре свега електричну енергију утрошену на рад система за грејање, рад помоћних уређаја и настале губитке у кабловима. На основу декларисане карактеристике суперкондензатора од стране произвођача [85], унутрашњи губици и губици у преносу до потрошача износе 2÷3 % од укупне преузете и враћене електричне енергије у суперкондензатор, што у конкретном

примеру износи између 0,304 и 0,456 kWh. Истраживање рекупериције електричне енергије на линији ЕКО 1 на већем узорку мерења и реалним условима експлоатације у оба смера обављено је 25.06.2018, 28.06.2018, 27.09.2018, 08.10.2019 и 09.10.2019. године [145].

Изабрани су датуми када системи за грејање и хлађење на возилу нису коришћени или су минимално коришћени само у неким периодима дана када су спољне температуре биле веће од 23 °C или мање од 12 °C, како би се што реалније сагледао коефицијент ефикасности рекупериције. Тренутне вредности напона суперкондензатора, јачине струје пражњења и јачине струје пуњења суперкондензатора и вредности SOC, преузете су са SD меморијске картице BMS контролне јединице која врши аквизицију података са V-CAN магистрале. Блок шема BMS контролне јединице која врши аквизицију података приказана је у Прилогу 3.

На основу једначина 7.17 и 7.18 израчуната је преузета и враћена електрична енергија у суперкондензатор Е-буса, односно разлика енергија која представља потрошену енергију Е-буса за смер "А" и смер "Б". Приказ резултата преузете електричне енергије из суперкондензатора ( $E_{pus_A}$ ), електричне енергије која је враћена у суперкондензатор ( $E_{rus_A}$ ), коефицијента ефикасности рекупериције ( $\lambda_{uc_A}$ ), просечне потрошње електричне енергије Е-буса ( $E_{ebus_{L_A}}$ ,  $E'_{ebus_{L_A}}$ ), спољне температуре и превозне брзине за смер "А" (Вуков споменик–Насеље Белвил) приказано је у табели 7.2 [145].

Табела 7.2 Резултати мерења преузете и враћене електричне енергије у суперкондензатор, ефикасности рекупериције и просечне потрошње енергије, на линији ЕКО 1, смер "А" (Вуков споменик-Насеље Белвил)

| Датум<br>д-м-г              | Е-бус | $T_{spo}$<br>°C | Време<br>почетка<br>вожње<br>hh:mm:ss | $T_{pA}$<br>hh:mm:ss | $v_{pA}$<br>km·h <sup>-1</sup> | $E_{pus_A}$<br>kWh | $E_{rus_A}$<br>kWh | $\lambda_{uc_A}$<br>% | $\Delta E_{uc_A}$<br>kWh | $E_{ebus_{L_A}}$<br>kWh·km <sup>-1</sup> | $E'_{ebus_{L_A}}$<br>kWh·km <sup>-1</sup> |
|-----------------------------|-------|-----------------|---------------------------------------|----------------------|--------------------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|--------------------------|--|---|
| 25-06-18                    | 2104  | 14              | 7:15:00                               | 0:28:15              | 15,87                          | 9,150              | 2,040              | 22,30                 | 7,110                    | 0,952                                    | 1,002                                     |
| 25-06-18                    | 2104  | 16              | 8:49:04                               | 0:30:28              | 14,71                          | 8,220              | 1,780              | 21,65                 | 6,440                    | 0,862                                    | 0,907                                     |
| 25-06-18                    | 2104  | 17              | 10:23:33                              | 0:27:02              | 16,58                          | 7,948              | 1,915              | 24,09                 | 6,033                    | 0,808                                    | 0,850                                     |
| 25-06-18                    | 2104  | 22              | 13:29:35                              | 0:29:38              | 15,12                          | 10,075             | 2,066              | 20,51                 | 8,009                    | 1,072                                    | 1,128                                     |
| 28-06-18                    | 2104  | 17              | 7:38:08                               | 0:31:32              | 14,21                          | 9,716              | 2,255              | 23,21                 | 7,461                    | 0,999                                    | 1,051                                     |
| 28-06-18                    | 2104  | 19              | 9:12:35                               | 0:27:41              | 16,19                          | 9,433              | 2,693              | 28,55                 | 6,740                    | 0,902                                    | 0,949                                     |
| 28-06-18                    | 2104  | 20              | 10:45:58                              | 0:27:09              | 16,51                          | 8,925              | 2,435              | 27,28                 | 6,490                    | 0,869                                    | 0,914                                     |
| 28-06-18                    | 2104  | 22              | 17:09:20                              | 0:28:22              | 15,80                          | 11,302             | 2,285              | 20,22                 | 9,017                    | 1,207                                    | 1,270                                     |
| 27-09-18                    | 2105  | 13              | 10:22:21                              | 0:28:10              | 15,91                          | 9,163              | 2,593              | 28,30                 | 6,570                    | 0,880                                    | 0,926                                     |
| 27-09-18                    | 2105  | 16              | 13:31:14                              | 0:31:07              | 14,40                          | 8,956              | 2,387              | 26,65                 | 6,569                    | 0,879                                    | 0,925                                     |
| 27-09-18                    | 2105  | 18              | 15:05:21                              | 0:34:22              | 13,04                          | 9,889              | 2,466              | 24,94                 | 7,423                    | 0,994                                    | 1,046                                     |
| 08-10-19                    | 2103  | 16              | 16:12:49                              | 0:32:20              | 13,86                          | 11,817             | 2,642              | 22,36                 | 9,175                    | 1,228                                    | 1,292                                     |
| 08-10-19                    | 2103  | 11              | 19:29:29                              | 0:33:10              | 13,51                          | 10,073             | 1,893              | 18,79                 | 8,180                    | 1,095                                    | 1,152                                     |
| 09-10-19                    | 2103  | 21              | 11:37:36                              | 0:32:54              | 13,62                          | 9,236              | 2,273              | 24,61                 | 6,963                    | 0,932                                    | 0,981                                     |
| 09-10-19                    | 2103  | 26              | 14:39:11                              | 0:32:50              | 13,65                          | 12,522             | 2,098              | 16,75                 | 10,424                   | 1,395                                    | 1,468                                     |
| 09-10-19                    | 2103  | 25              | 16:12:56                              | 0:33:25              | 13,41                          | 11,882             | 2,309              | 19,43                 | 9,573                    | 1,282                                    | 1,349                                     |
| 09-10-19                    | 2103  | 13              | 22:26:16                              | 0:34:15              | 13,09                          | 9,504              | 2,352              | 24,75                 | 7,152                    | 0,957                                    | 1,007                                     |
| <b>Средње<br/>вредности</b> |       | <b>18</b>       |                                       | 0:30:45              | <b>14,68</b>                   | <b>9,871</b>       | <b>2,264</b>       | <b>22,93</b>          | <b>7,608</b>             | <b>1,018</b>                             | <b>1,072</b>                              |

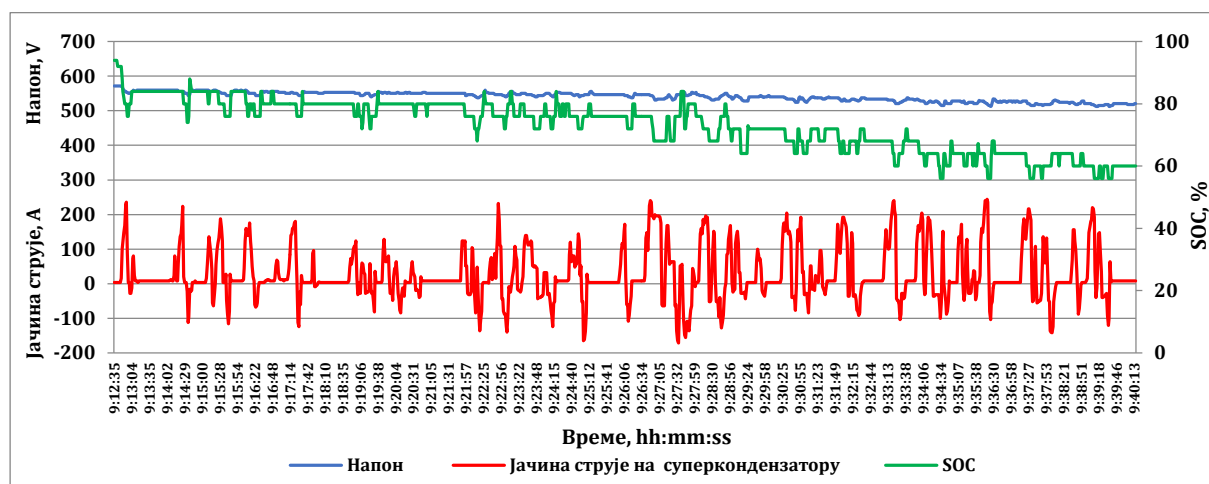
' са урачунатим губитком у фази пуњења

Највећа вредност електричне енергије која је враћена у суперкондензатор у смеру "А" износи 2,693 kWh (28.06.2018, период од 9:12:35 до 9:40:13), најмања вредност 1,780 kWh (25.06.2018, период од 8:49:04 до 9:19:32), док је просечна вредност за

сва приказана мерења остварене енергије која је враћена у суперкондензатор 2,264 kWh.

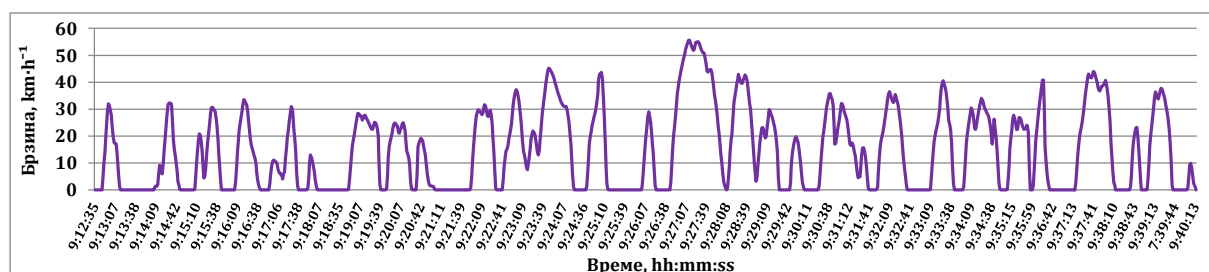
Ако се анализира однос укупно враћене енергије и укупно преузете електричне енергије суперкондензатора, преко коефицијента ефикасности рекуперације  $\lambda_{исА}$ , произилази да је његова максимална вредност 28,55%, минимална 16,75%, а просечна вредност која се остварује у смеру "А" је 22,93%. Очигледан је неповољан утицај спољне температуре и рада система за хлађење код Е-буса г.б. 2103 дана 09.10.2019 за полазак који се реализовао у 14:39:11 на вредност коефицијента ефикасности рекуперације и просечне потрошње електричне енергије Е-буса која је износила 1,468 kWh·km<sup>-1</sup>.

Графички приказ измерених тренутних вредности напона суперкондензатора, јачине струје пуњења/пражњења суперкондензатора и SOC, када је остварена највећа вредност електричне енергије која је враћена у суперкондензатор од 2,693 kWh, на Е-бус г.б. 2104 (28.06.2018. године, од 9:12:35 до 9:40:13), приказано је на слици 7.3.



Слика 7.3 Тренутне вредности напона, јачине струје и SOC, суперкондензатора у периоду 9:12:35÷9:40:13, смер "А", 28.06.2018. године

У фази регенеративног кочења Е-буса, максимална тренутна јачина струје пуњења суперкондензатора износила је 171,1 А у 9:27:29, при брзини кретања Е-буса од 46,9 km·h<sup>-1</sup>. Возни циклус који је Е-бус г.б. 2104 остварио у периоду од 9:12:35 до 9:40:13, приказан је на слици 7.4.



Слика 7.4 Тренутне вредности брзине кретања Е-буса, г.б.2104, у периоду 9:12:35÷9:40:13, смер "А", 28.06.2018. године

Из слике 7.4 закључује се да је време превоза у смеру "А" у наведеном временском периоду износила 27 минута и 41 секунди (00:27:41), што указује на оптималне

саобраћајне услове, без гужви и застоја што је био предуслов да Е-бус достигне неколико пута брзине кретња од преко  $40 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , на Бранковом мосту  $55,2 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , што је Е-бусу дало велику кинетичку енергију у фази кочења и могућност генерисања максималне јачине струје рекуперације система електромотор-инвертор, која је износила од 150 А до 171,1 А, што је враћено у суперкондензатор.

За смер "Б" (Насеље Белвил-Вуков споменик) приказ резултата преузете електричне енергије из суперкондензатора ( $E_{p_{ucB}}$ ), електричне енергије која је враћена у суперкондензатор ( $E_{r_{ucB}}$ ), коефицијента ефикасности рекуперације ( $\lambda_{ucB}$ ), просечне потрошње електричне енергије Е-буса ( $E_{ebusLB}$ ,  $E'_{ebusLB}$ ), спољне температуре и превозне брзине за смер "Б" приказано је у табели 7.3.

Табела 7.3 Резултати мерења преузете и враћене електричне енергије у суперкондензатор, ефикасности рекуперације и просечне потрошње енергије, на линији ЕКО 1, смер "Б" (Белвил-Вуков споменик)

| Датум<br>[д-м-г]            | Е-бус | $T_{spo}$<br>°C | Време<br>почетка<br>вожње<br>hh:mm:ss | $T_{pB}$<br>hh:mm:ss | $v_{pB}$<br>$\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ | $E_{p_{ucB}}$<br>kWh | $E_{r_{ucB}}$<br>kWh | $\lambda_{ucB}$<br>% | $\Delta E_{ucB}$<br>kWh | $E_{ebusLB}$<br>$\text{kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ | $E'_{ebusLB}$<br>$\text{kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ |
|-----------------------------|-------|-----------------|---------------------------------------|----------------------|---|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|---|--|
| 25-06-18                    | 2104  | 13              | 6:22:10                               | 0:34:49              | 14,65                                     | 11,828               | 1,702                | 14,39                | 10,126                  | 1,191   | 1,254  |
| 25-06-18                    | 2104  | 14              | 8:01:30                               | 0:34:33              | 14,76                                     | 12,372               | 1,844                | 14,90                | 10,528                  | 1,239   | 1,304  |
| 25-06-18                    | 2104  | 17              | 9:35:30                               | 0:34:12              | 14,91                                     | 10,974               | 1,371                | 12,49                | 9,603                   | 1,130   | 1,189  |
| 25-06-18                    | 2104  | 23              | 15:52:02                              | 0:39:55              | 12,78                                     | 14,434               | 1,866                | 12,93                | 12,568                  | 1,479   | 1,557  |
| 28-06-18                    | 2104  | 16              | 6:47:21                               | 0:31:19              | 16,29                                     | 13,439               | 2,510                | 18,68                | 10,929                  | 1,286   | 1,354  |
| 28-06-18                    | 2104  | 19              | 9:58:44                               | 0:30:16              | 16,85                                     | 12,806               | 2,506                | 19,57                | 10,300                  | 1,212   | 1,276  |
| 28-06-18                    | 2104  | 26              | 16:18:40                              | 0:40:21              | 12,64                                     | 17,415               | 2,480                | 14,24                | 14,935                  | 1,757   | 1,849  |
| 27-09-18                    | 2105  | 14              | 11:09:59                              | 0:33:07              | 15,40                                     | 12,736               | 2,333                | 18,32                | 10,403                  | 1,224   | 1,288  |
| 27-09-18                    | 2105  | 16              | 12:44:19                              | 0:33:36              | 15,18                                     | 11,264               | 1,732                | 15,38                | 9,532                   | 1,121   | 1,180  |
| 27-09-18                    | 2105  | 17              | 14:18:07                              | 0:36:32              | 13,96                                     | 12,497               | 1,931                | 15,45                | 10,566                  | 1,243   | 1,308  |
| 27-09-18                    | 2105  | 18              | 15:51:33                              | 0:37:17              | 13,68                                     | 12,677               | 1,909                | 15,06                | 10,768                  | 1,267   | 1,334  |
| 08-10-19                    | 2103  | 16              | 16:56:59                              | 0:47:20              | 10,77                                     | 13,877               | 1,567                | 11,29                | 12,310                  | 1,448   | 1,524  |
| 09-10-19                    | 2103  | 8               | 5:56:01                               | 0:34:15              | 14,89                                     | 13,477               | 1,311                | 9,73                 | 12,166                  | 1,431   | 1,506  |
| 09-10-19                    | 2103  | 15              | 9:12:26                               | 0:42:45              | 11,93                                     | 13,764               | 1,355                | 9,84                 | 12,409                  | 1,460   | 1,537  |
| 09-10-19                    | 2103  | 25              | 13:53:21                              | 0:38:55              | 13,10                                     | 14,649               | 1,809                | 12,35                | 12,840                  | 1,511   | 1,591  |
| 09-10-19                    | 2103  | 24              | 17:00:11                              | 0:46:04              | 11,07                                     | 15,225               | 1,576                | 10,35                | 13,649                  | 1,606   | 1,691  |
| <b>Средње<br/>вредности</b> |       | <b>17,6</b>     |                                       | <b>0:37:12</b>       | <b>13,93</b>                              | <b>13,340</b>        | <b>1,863</b>         | <b>13,96</b>         | <b>11,477</b>           | <b>1,350</b>                                    | <b>1,421</b>                                     |

*'са урачунатим губитком у фази пуњења*

У смеру "Б", највећа вредност електричне енергије која је враћена у суперкондензатор износи 2,510 kWh (28.06.2018, период од 6:47:21 до 7:18:46), најмања вредност враћене енергије у суперкондензатор је 1,311 kWh (09.10.2019, период од 5:56:01 до 6:30:16), док је просечна вредност приказаних резултата враћене електричне енергије у суперкондензатор 1,863 kWh. Однос враћене електричне енергије и укупно преузете електричне енергије суперкондензатора, исказан преко коефицијента ефикасности рекуперације  $\lambda_{ucLB}$ , је максимално 19,57%, минимално 9,73%, а просечна вредност  $\lambda_{ucLB}$  која је остварена у смеру "Б" је 13,96%. У смеру "Б" траса линије од Бранковог моста до Правног факултета је у благом успону, што има утицај на већу потребну енергију за савлађивање отпора кретању Е-буса и мање захтевану енергију за кочење Е-буса, што има утицај на мању електричну енергију рекуперације која настаје од погонског електромотора у режиму генератора приликом успоравања и кочења у поређењу са смером "А". У смеру "Б" постоји карактеристични случај утицаја рада система за грејање Е-буса на пад коефицијента ефикасности рекуперације. При спољној температури од 8 °C

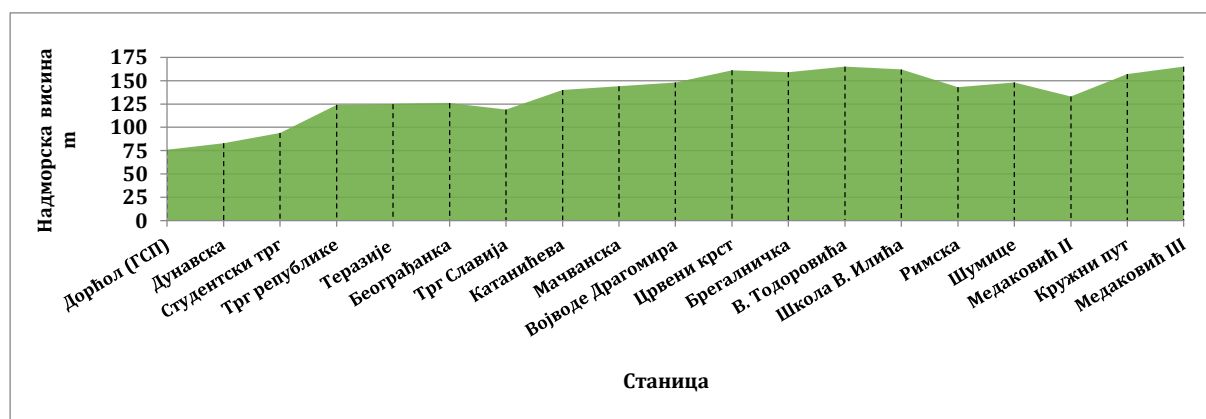


која је забележена 9.10.2019. године у периоду од 5:56:01 до 6:30:16, са малим бројем путника у возилу, укупно преузета електрична енергија из суперкондензатора је 13,477 kWh, враћена енергија у суперкондензатор 1,311 kWh, што даје вредност коефицијента рекуперације од 9,73% и просечну потрошњу Е-буса од 1,506 kWh·km<sup>-1</sup>. Под претпоставком да су системи за хлађење и грејање искључени, вредност остварене електричне енергије која ће бити враћена у суперкондензатор у смеру "А" или смеру "Б", највише зависи од броја циклуса кочења, брзине возила у моменту кочења, присуство успона или пада деонице на којој се кочи возило и технике (стила) вожње возача при коме се остварује максимална енергија рекуперације.

## 7.2 Мерење рекуперације електричне енергије на линији бр. 29 (Дорћол-Медаковић III)

Мерење потрошње и рекуперације електричне енергије Е-буса Higer KLQ6125GEV3 на линији бр. 29 (Дорћол-Медаковић III) имало је циљ сагледавање могућности коришћења аутобуса на електрични погон на градским линијама у Београду са високим тежинским факторима експлоатације, од којих су посебно важни оптерећеност возила и присуство деоница са већим уздужним нагибима трасе. Из наведених разлога линија бр. 29 (Дорћол-Медаковић III) у потпуности представља меродавну линију за спровођење теста, посматрано са аспекта токова путника, дужине трасе, присуство нагиба (успони/падови), броја станица и возног циклуса.

Средња дужина линије је 9,0 km, број станица у смеру "А" је 19, а у смеру "Б" је 20. Просечна превозна брзина је између 10,7 km·h<sup>-1</sup> и 14,8 km·h<sup>-1</sup>, зависно од карактеристичног периода рада током дана. Линија пролази кроз централну градску зону, коју у саобраћајном смислу карактеришу интензивни токови возила и присуство великог броја семафорисаних раскрсница, што за последицу има мале брзине кретања посебно на деоници Трг Славија – Трг републике. Трасу линије бр. 29 карактеришу нагиби (успони/падови), што је посебно важно ради сагледавања ефекта рекуперације електричне енергије која се јавља у фази кочења Е-буса. На слици 7.5 представљена је висинска карактеристика трасе линије бр. 29.



Слика 7.5 Висинска карактеристика трасе линије бр. 29 (Дорћол-Медаковић III)

Почетна станица "Дорћол-ГСП" има надморску висину од 74 m, док станица "Велимира Тодоровића" има надморску висину од 165 m. На линији бр. 29 у смеру "Б", траса линије са негативним нагибом (деонице са падом) присутне су на већем



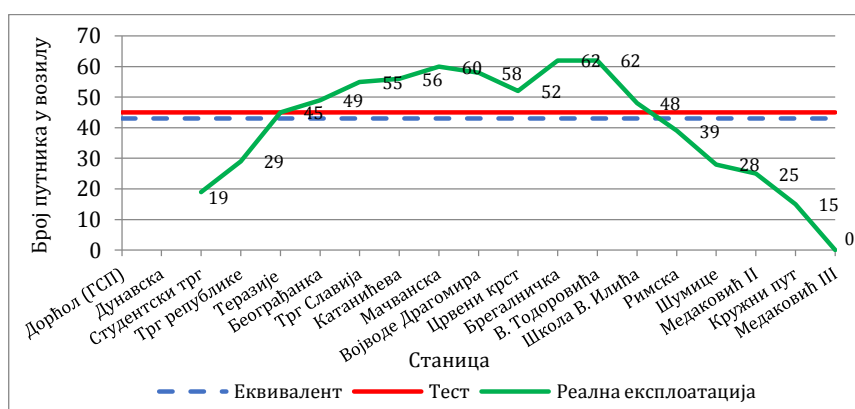
делу трасу (око 72,6%), где је просечна вредност нагиба -2,44% а највећа вредност нагиба на међустаничном растојању -6,69%.

Мерење је обављено 09. марта 2017. године, на Е-бусу г.б. 2104, коришћењем 3 мерна уређаја Fluke 289, струјних кљешта Fluke 1010 и уређаја Fluke 190-204 Score meter [52]. Први мерни уређај мерио је тренутне вредности напона на суперкондензатору, други је мерио тренутне вредности јачине струје пражњења и пуњења суперкондензатора, а трећи уређај био је постављен на инвертору вучних мотора и мерио је тренутну вредност јачине струје за погон електромотора и јачину струје рекуперације.

Услови тестирања:

- У току тестирања системи за грејање и хлађење на возилу били су искључени, тако да добијене вредности потрошње електричне енергије исказане у kWh и kWh·km<sup>-1</sup>, представљају утрошену енергију на погон возила и рад помоћних уређаја (компресор, пумпа управљача, осветљење...);
- Возило је било оптерећено константним бројем путника и стајало је на свим станицама где су се отварао врата симулирајући уласке/изласке путника;
- Мерење је обављено са неоптерећеним возилом (6 путника) у смеру "А" од 7:36:40 до 8:14:55 часова и смеру "Б" од 9:53:20 до 10:30:20 часова;
- Мерење је обављено са оптерећеним возилом (45 путника) у смеру "А" од 11:18:40 до 11:57:20 часова;
- У смеру "Б" из техничких и организационих разлога није било могуће обавити тест са оптерећеним возилом;
- Током тестирања саобраћајни услови су били идентични, што се види из остварених времена превоза, тако да нису имали утицај на добијене резултате.

Тренутно у редовној експлоатацији на линији бр. 29 (Студентски трг-Медаковић III) раде тролејбуси. Карактеристике протока путника (број путника у возилу) у поподневном вршном оптерећењу у смеру "А", које су снимљене 7. марта 2017. године у периоду од 16:01:00 до 16:43:19, за један тролејбус, представљене су зеленом линијом на слици 7.6.



Слика 7.6 Карактеристике протока путника за један тролејбус стандардне дужине на линији бр. 29

Максимални проток путника у возилу (максимални број путника у возилу) износи 62 путника на станици "Црвени крст". Користећи формулу:

$$Z_{sm} = \frac{(Z_1 L_1 + Z_2 L_2 + \dots + Z_i L_i)}{L_A}, \quad (7.21)$$

где је:

$Z_{sm}$  – средња вредност протока путника,

$Z_i$  - проток путника у возилу између станица,  $i=1,2,3,\dots, n-1$ ,

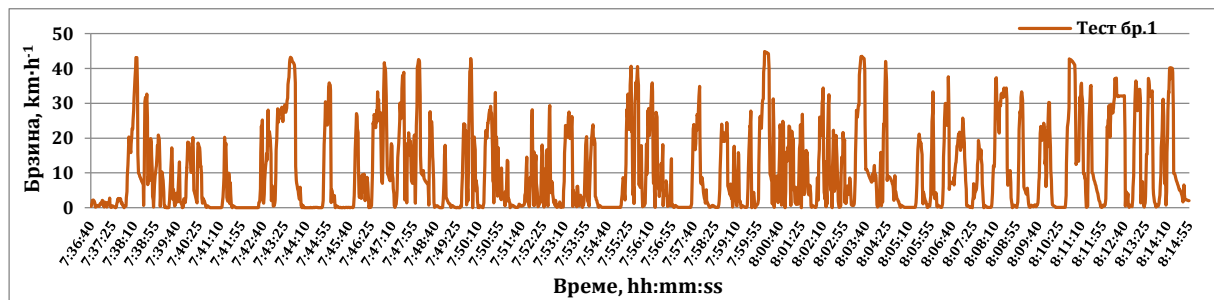
$L_j$  - међустанично растојање, km,  $j=1,2,3,\dots, n-1$ ,

$L_A$  - дужина трасе у смеру "А", km,

произилази да је средња вредност протока 43 путника, што је еквивалент реалном броју путника и то је приказано плавом линијом. На тесту је било укупно 45 путника (црвена линија).

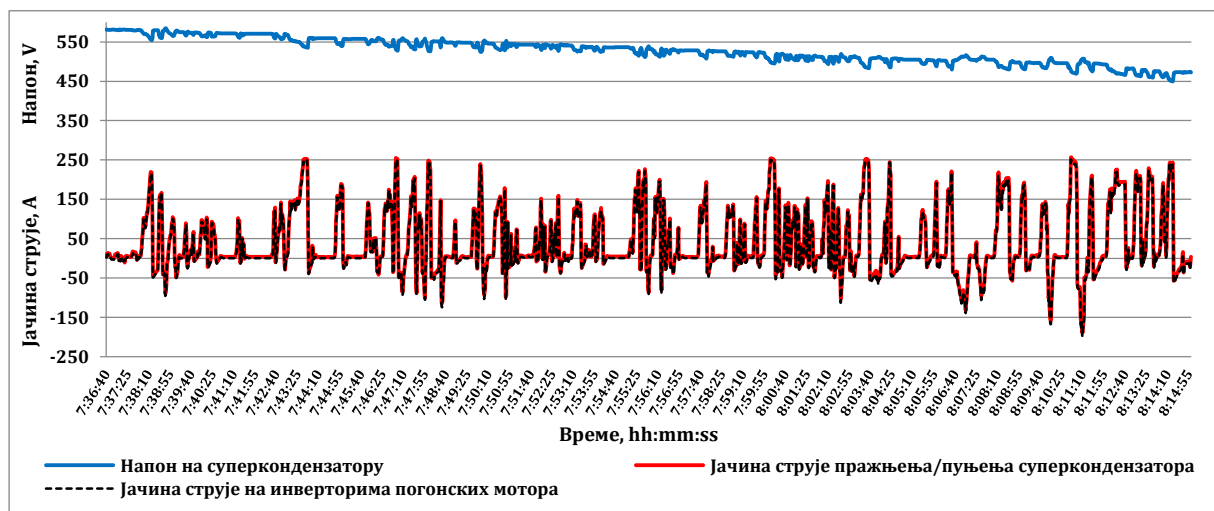
### **Тест бр. 1 (смер "А" - неоптерећено возило, период 7:36:40 до 8:14:55)**

На слици 7.7 дат је приказ оствареног возног циклуса у периоду од 7:36:40 до 8:14:55 часова.



Слика 7.7 Тренутне вредности брзине кретања Е-буса, г.б.2104, у периоду 7:36:40÷8:14:55, смер "А", 9. март 2017. године

Време превоза износило је 38 минута и 15 секунди (00:38:15). Е-бус је остварио максималну брзину кретања од 44,86 km·h<sup>-1</sup>. На слици 7.8 представљени су резултати измерених тренутних вредности напона на суперкондензатору, јачине струје пражњења и пуњења суперкондензатора и јачине струје на инверторима погонских мотора, који се односе на неоптерећено возило у смеру "А" (Дорћол-Медаковић III), које обухвата период од 7:36:40 до 8:14:55 часова.



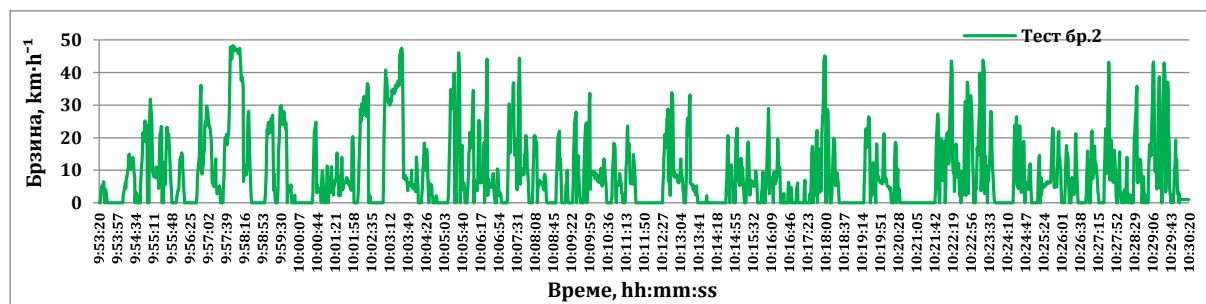
Слика 7.8 Тренутне вредности напона суперкондензатора, јачине струје пражњења и пуњења суперкондензатора и јачине струје на инверторима погонских мотора - смер "А"-неоптерећено возило, период од 7:36:40 до 8:14:55

Напон на суперкондензатору се смањивао од 584,7 V на почетку вожње, до 472,5 V на крају вожње. Јачина струје пражњења суперкондензатора у директној је

зависности од ангажоване снаге погонских електромотора која је потребна за савлађивања отпора кретања и рада помоћних уређаја. Максимална јачина струје пражњења достигала је 256,9 А на деоницама трасе са највећим успонима. На деоницама са падом Е-бус је остваривао у фази кочења рекуперацију електричне енергије са максималном вредношћу јачине струје од око 190,01 А, која је предата суперкондензатору. Измерена вредност максималне јачине струје на инвертору погонских електромотора је 250,8 А док је максимална јачина струје рекуперације на инвертору износила 198,5 А.

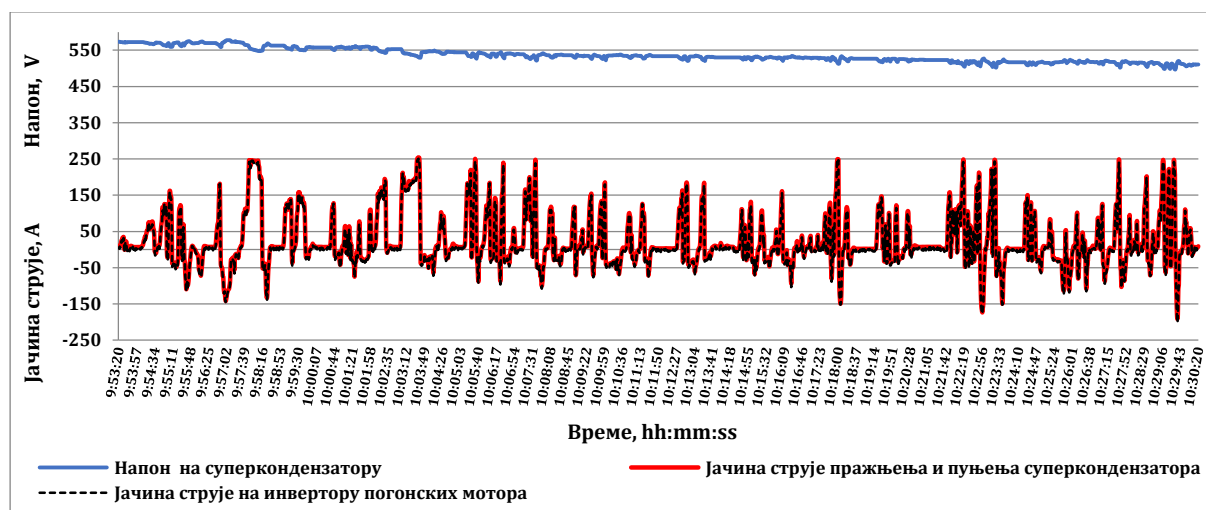
### **Тест бр. 2 (смер "Б" - неоптерећено возило, период 9:53:20 до 10:30:20)**

На слици 7.9 дат је приказ оствареног возног циклуса у периоду од 9:53:20 до 10:30:20 часова.



Слика 7.9 Тренутне вредности брзине кретања Е-буса, г.б.2104, у периоду 9:53:20÷10:30:20, смер "Б", 9. март 2017. године

Време превоза износило је 37 минута (00:37:00). Е-бус је остварио максималну брзину кретања од 48,23 km·h<sup>-1</sup>. На слици 7.10 приказани су резултати измерених тренутних вредности напона на суперкондензатору, јачине струје пражњења и пуњења суперкондензатора и јачине струје на инверторима погонских мотора који се односе на неоптерећено возило у смеру "Б", које обухвата период од 9:53:20 до 10:30:20 часова.



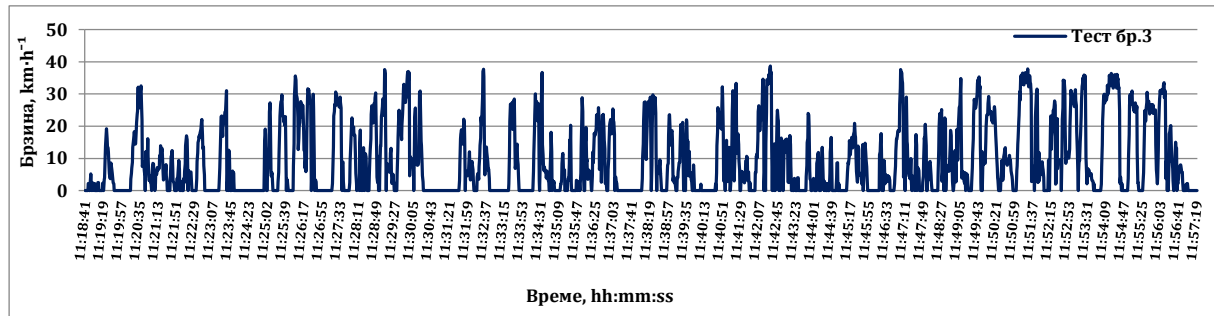
Слика 7.10 Тренутне вредности напона суперкондензатора, јачине струје пражњења и пуњења суперкондензатора и јачине струје на инверторима погонских мотора - смер "Б", неоптерећено возило, период од 9:53:20 до 10:30:20

Са слике се види да се напон смањивао од 577,9 V на почетку вожње до 510,5 V на крају вожње. Доња вредност напона у смеру "Б" далеко је већа него у случају вожње у смеру "А", што указује на лакши возни циклус, односно мању ангажовану

снагу потребну за кретање возила с обзиром да је у смеру "Б" већи део трасе у паду. Максимална јачина струје пражњења суперкондензатора достигала је 254,2 А, док је максимална јачина струје рекуперације у суперкондензатору била 191,7 А. Измерена вредност максималне јачине струје на инвертору погонских електромотора је 252,2 А, док је максимална јачина струје рекуперације на инвертору износила 201,6 А.

### **Тест бр. 3 (смер "А" - оптерећено возило, период 11:18:40 до 11:57:20)**

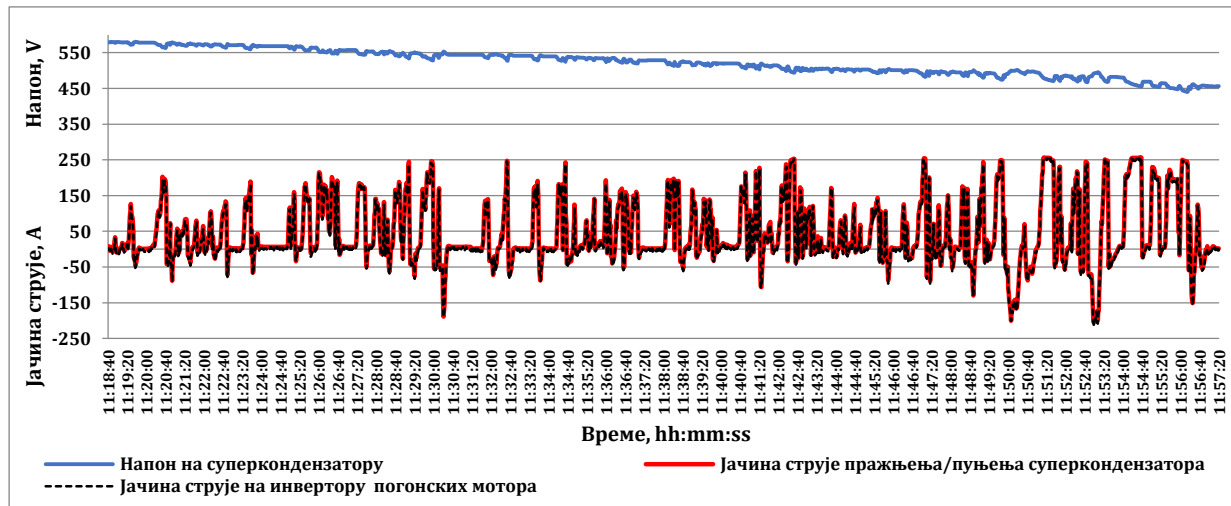
На слици 7.11 дат је приказ оствареног возног циклуса у периоду од 11:18:40 до 11:57:20 часова.



Слика 7.11 Тренутне вредности брзине кретања Е-буса, г.б.2104, у периоду 11:18:40÷11:57:20, смер "А", 9. март 2017. године

Време превоза износило је 38 минута и 40 секунди (00:38:40). Е-бус је остварио максималну брзину кретања од 38,72 km·h<sup>-1</sup>.

Резултати измерених тренутних вредности напона на суперкондензатору, јачине струје пражњења /пуњења суперкондензатора и јачине струје на инверторима погонских мотора за оптерећено возило у смеру "А" (Дорћол-Медаковић III) за период од 11:18:40 до 11:57:20 часова приказани су на слици 7.12.



Слика 7.12 Тренутне вредности напона суперкондензатора, јачине струје пражњења и пуњења суперкондензатора и јачине струје на инверторима погонских мотора - смер "А", оптерећено возило, период од 11:18:40 до 11:57:20

Максимална вредност јачине струје пражњења суперкондензатора је 256,5 А, док је максимална јачина струје рекуперације износила 205,4 А. На инвертору измерена је максимална јачина струје за погон електромотора од 255,3 А, док је у генераторском режиму рада електромотора забележена максимална јачина струје

од 215,1 А. Напон на суперкондензатору, на почетку вожње износио је 579,1 V, а на крају вожње вредност напона је износила 456,0 V.

Различите максималне тренутне вредности јачине струје на инвертору, односно суперкондензатору, у фази кретања и кочења доказују утицај оптерећености возила и присуства успона или падова дуж трасе на добијене вредности.

Ако се измерене тренутне вредности јачине струје пражњења и пуњења суперкондензатора, напона суперкондензатора и јачине струје на инвертору погонских мотора посматрају у функцији времена користећи формуле 7.17, 7.18, 7.19 и 7.20 могу се добити вредности укупно преузете и враћене енергије на суперкондензатору, односно енергије рекуперације система погонски електромотор-инвертор у режиму генератора током регенеративног кочења, као и вредности коефицијента рекуперације погонског система електромотора-инвертора и коефицијента ефикасности рекуперације суперкондензатора, што је приказано у табели 7.4.

Табела 7.4 Резултати мерења потрошње и рекуперације електричне енергије на линији бр. 29, Е-бус з.б 2104, 9. март 2017. године

|  | Ознака, јединица                                    | Тест бр. 1<br>Смер "А"<br>неоптерећено<br>возило | Тест бр. 2<br>Смер "Б"<br>неоптерећено<br>возило | Тест бр. 3<br>Смер "А"<br>оптерећено<br>возило |
|--|---|--|--|--|
| Дужина трасе   | $L$ , km  | 9,1  | 8,9  | 9,1  |
| Време почетка вожње  | hh:mm:ss  | 7:36:40  | 9:53:20  | 11:18:40                                       |
| Време завршетка вожње  | hh:mm:ss  | 8:14:55  | 10:30:20   | 11:57:20                                       |
| Време превоза  | $T_p$ , hh:mm:ss                                    | 0:38:15  | 0:37:00  | 0:38:40  |
| Превозна брзина  | $V_p$ , km·h <sup>-1</sup>                          | 14,27  | 14,43  | 14,12  |
| <b>Суперкондензатор:</b>                                       |   |  |  |  |
| Преузета енергија  | $E_{puc}$ , kWh                                     | 16,097   | 11,909   | 17,994   |
| Враћена енергија   | $E_{ruc}$ , kWh                                     | 2,959  | 4,022  | 3,296  |
| Разлика енергија   | $\Delta E_{uc}$ , kWh                               | 13,138   | 7,887  | 14,698   |
| Коефицијент ефикасности рекуперације                           | $\lambda_{uc}$ , %                                  | 18,38  | 33,77  | 18,32  |
| <b>Потрошња електричне енергије Е-буса</b>                     | <b><math>E_{ebusL}</math>, kWh·km<sup>-1</sup></b>  | <b>1,444</b>                                     | <b>0,886</b>                                     | <b>1,615</b>                                   |
| <b>Потрошња електричне енергије Е-буса, са губицима пуњења</b> | <b><math>E'_{ebusL}</math>, kWh·km<sup>-1</sup></b> | <b>1,520</b>                                     | <b>0,932</b>                                     | <b>1,700</b>                                   |
| <b>Погонски систем (електромотори-инвертори)</b>               |   |  |  |  |
| Потрошена енергија   | $E_{em}$ , kWh                                      | 15,184   | 11,079   | 16,979   |
| Енергија рекуперације  | $E_{emr}$ , kWh                                     | 3,361  | 4,845  | 3,909  |
| Разлика енергије   | $\Delta E_{em}$ , kWh                               | 11,823   | 6,234  | 13,070   |
| Коефицијент рекуперације                                       | $\lambda_{rec}$ , %                                 | 22,14  | 43,73  | 23,02  |
| Потрошена електрична енергија за рад помоћних уређаја          | $E_{pu}$ , kWh                                      | 1,315  | 1,653  | 1,628  |

У смеру "А", где је био доминантан утицај уздужног успона, код неоптерећеног Е-буса разлика енергија на суперкондензатору која представља потрошену електричну енергију Е-буса, износи 13,138 kWh, односно 1,520 kWh·km<sup>-1</sup>. Електрична енергија која је враћена у суперкондензатор је 2,959 kWh, а преузета електрична енергија из суперкондензатора 16,097 kWh, из чега произилази да је коефицијент ефикасности рекуперације 18,38%. У смеру "Б", где је био доминантан утицај трасе са падом, добијене су значајно различите вредности наведених величина него у случају вожње у смеру "А". Електрична енергија која је враћена у суперкондензатор је 4,022 kWh, а преузета енергија из

суперкондензатора 11,909 kWh, тако да је коефицијент ефикасности рекуперације 33,77%.

Разлика енергија на суперкондензатору износи 7,887 kWh, односно потрошња Е-буса је  $0,932 \text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ . Очигледан је утицај трасе линије у смеру "Б" са већим присуством падова пута на коефицијент ефикасности рекуперације електричне енергије и потрошњу електричне енергије Е-буса, што потврђује део полазне *Хипотезе 3* да на потрошњу електричне енергије утичу геометријске карактеристике трасе линија. У конкретном примеру у смеру "Б", потрошња електричне енергије мања је за 62,9% у поређењу са смером "А", кад је возило било неоптерећено.

Ако се анализира утицај оптерећености возила у смеру "А", у случају оптерећеног возила са 45 путника, преузета електрична енергија из суперкондензатора је за 1,897 kWh већа него у случају неоптерећеног возила, као последица веће потребне енергије за савлађивање отпора кретања а због веће масе Е-буса.

Електрична енергија која је враћена у суперкондензатор је већа за 11,3% (3,296 kWh у поређењу са 2,959 kWh). Ако поредимо потрошњу електричне енергије Е-буса по пређеном километру пута, у случају оптерећеног возила, потрошња је  $1,700 \text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ , односно већа је за 11,8% у поређењу са неоптерећеним возилом. Треба напоменути да оптерећеност са 45 путника представља око 55% оптерећења Е-буса, чији је максимални капацитет 80 путника.

Из табеле 7.4 се види да је електрична енергија рекуперације генерисана у погонским електромоторима током регенеративног кочења, а која је предата инверторима, увек већа него на суперкондензатору. У наведеним примерима она је већа за 0,402 kWh, 0,823 kWh и 0,613 kWh посматрано респективно за тест бр. 1, 2, 3.

Разлика електричне енергије рекуперације између инвертора и суперкондензатора представља електричну енергију утрошену на рад помоћних уређаја и настале губитке у кабловима.

Разлика потрошене електричне енергије из суперкондензатора и потрошене енергије инвертора за погон електромотора је 0,913 kWh, 0,830 kWh и 1,015 kWh посматрано за тест бр. 1, 2, 3, што такође представља потрошену енергију за рад помоћних уређаја на Е-бусу.

Из наведеног произилази да је потрошња електричне енергије помоћних уређаја (компресор, пумпа хидро погона, осветљење) износила 1,315 kWh, 1,653 kWh и 1,628 kWh, респективно за тест бр. 1, 2, 3.

## **8. ЕКОЛОШКЕ ПЕРФОРМАНСЕ РАДА АУТОБУСА НА ЕЛЕКТРИЧНИ ПОГОН НА ЛИНИЈАМА ЈАВНОГ ГРАДСКОГ ТРАНСПОРТА У БЕОГРАДУ**

Транспорт као привредна грана и потреба људи за коришћењем различитих типова друмских возила за превоз путника и терета, ради обављања свакодневних привредних и друштвених активности, имају негативне еколошке ефекте који нарушавају радну и животну средину. Возила са моторима СУС, у које спадају и аутобуси за јавни градски транспорт, су један од узрока емисије издувних штетних гасова и буке који неповољно утичу на стање животне средине у већини великих градова Европе и света. Важан аспект нарушавања животне средине као последица сагоревања нафтних деривата у моторима СУС представља емисија угљен-диоксида CO<sub>2</sub>, који утиче на глобално загревање и промену климе. У развијеним државама примењен је низ мера које за циљ имају смањење емисије загађујућих материја и буке која настаје од возила. Једна од мера је све веће ангажовање аутобуса са алтернативним погонским системима од којих аутобуси са електричним погоном имају најважније место и улогу.

Према извештају Светске здравствене организације, WHO (World Health Organisation) из 2000. године, присуство штетних материја у ваздуху је доказани узрочник бројних хроничних и акутних обољења код људи [5]. Посебно су деца млађа од 5 година угрожена негативним дејством штетних материја у ваздуху [146]. У извештају из 2012. године, WHO је објавила да у свету 3,7 милиона људи умре годишње због последица аерозагађења. У Републици Србији према истом извештају као последица загађености ваздуха прерано умре више од 5.600 особа [147,148].

Увођење аутобуса на електрични погон у редовну експлоатацију на линији ЕКО 1 (Вуков споменик-Насеље Белвил) веома је значајно са аспекта анализе еколошких перформанси и предности у поређењу са градским аутобусима који за погон користе дизел гориво и КПП. Ово је једна од стратешких мера која има за циљ замену одређеног броја аутобуса са дизел погоном на централним градским линијама у Београду, чиме се утиче на смањење емисије штетних гасова и буке која потиче од аутобуса за јавни градски транспорт.

Град Београд са непосредним окружењем представља саобраћајно и привредно најразвијенију регију у Србији. Највећи утицај на аерозагађење у Београду имају: индустријска постројења, топлане, домаћинстава и саобраћај [149]. У централним градским зонама аерозагађење које потиче од путничких аутомобила, доставних возила и аутобуса за градски превоз је доминантан вид загађења [149].

Саобраћајнице у централним градским зонама карактерише висока густина саобраћајног тока посебно у јутарњим и поподневним сатима, што има за последицу сагоревање великих количина нафтних деривата и емисију издувних гасова. Додатни фактор још већег аерозагађења на појединим локацијама у граду су саобраћајна загушења, као последица засићеног саобраћајног тока и конфигурација стамбених и других објеката ("кањонски тип" саобраћајница) које не дозвољавају струјања ваздуха.



## 8.1 Анализа еколошких перформанси аутобуса на електрични погон

Аутобуси на електрични погон сврставају се у категорију возила без издувне емисије (zero emission vehicles), с обзиром да за погон користе електричну енергију. У том смислу могу се анализирати аспекти утицаја на животну средину непосредног окружења, где се возила налазе у раду (локални ниво) који се у литератури назива од "резервоара до точка", TTW (Tank to Wheel) и еколошки утицај на шире окружење односно регију или државу који је познат као анализа "од извора до точка", WTW (Well to Wheel). У случају анализе TTW, погонски систем аутобуса на електрични погон нема емисију: угљен-моноксида, азотних-оксида, угљоводоника и микрочестица.

Еколошки утицај на локалном нивоу је минималан, с обзиром да једини негативни утицај на окружење потиче од настанка микрочестица и прашине услед контакта пнеуматика и пута, од трења кочних облога и испарења радних флуида (уље за подмазивање трансмисије, течности против замрзавања, итд) који се могу занемарити. Анализа TTW код аутобуса на електрични погон може се посматрати у контексту еколошког ефекта који се постиже заменом аутобусима који користе дизел гориво или КПП, квантификацијом количине загађујућих материја која се неће емитовати у атмосферу као последица супституције возила.

Начин производње и преноса електричне енергије од суштинског је значаја када се анализирају утицаји еколошки перформанси аутобуса на електрични погон на регионалном или државном плану, односно анализа WTW. Анализа WTW емисије угљен-диоксида је важна ради сагледавања и поређења нивоа емисије коју емитују аутобуси са различитим системима погона, укључујући и аутобусе на чисто електрични погон. Овде је посебно важан аспект емисије угљен-диоксида који настаје у фази производње електричне енергије, с обзиром да се електрична енергија добија из различитих извора.

Производња електричне енергије из термоелектрана, где се као примарно гориво користи угаљ, значи и знатан утицај на животну средину који се мора сагледати кроз количину емисије CO<sub>2</sub>.

Важан аспект еколошких перформанси представља нижи ниво буке коју аутобуси на електрични погон емитују током рада у поређењу са аутобусима који користе дизел гориво.

Специфичност аутобуса на електрични погон је рециклажа возила након истека животног века која се, због присуства различитих хемијских и електронских компоненти, битно разликује од рециклаже аутобуса који користе дизел гориво или КПП.

## 8.2 Анализа емисије угљен-диоксида CO<sub>2</sub>

Познато је да се приликом сваке реакције сагоревања у природи ослобађа топлота, водена пара и угљен-диоксид. Генерално приликом сагоревања фосилног горива (бензин, дизел, КПП, угаљ...) количина насталог угљен-диоксида може се израчунати према једначини:

$$m_{CO_2} = m_{fg} \cdot g_c \cdot \frac{44}{12}, \quad (8.1)$$



где је:

$m_{CO_2}$  - маса насталог угљен-диоксида, g,

$m_{fg}$  - маса фосилног горива које сагорева, g,

$g_c$  - садржај угљеника у гориву, %,

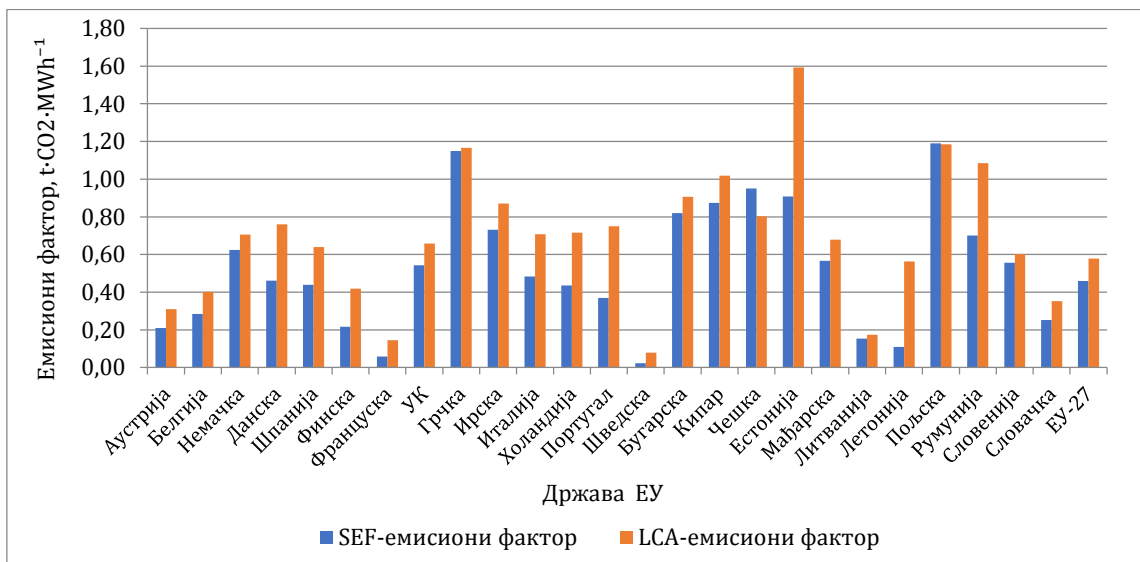
44 - моларна маса угљен-диоксида,  $g \cdot mol^{-1}$ ,

12 - моларна маса угљеника,  $g \cdot mol^{-1}$ .

У еколошком смислу, најчистији начин производње електричне енергије, где практично немамо емисију угљен-диоксида је производња електричне енергије из потпуно обновљивих извора, као што су хидроелектране, ветрогенератори или соларни панели. У многим државама производња електричне енергије добија се из различитих извора, где је у неким државама у великом проценту заступљена производња из термоелектрана које као примарно гориво користе угаљ, а ређе мазут или природни гас. Неке државе користе и електричну енергију произведену у нуклеарним електранама која се такође сматра "чистом" енергијом уз присуство ризика коришћења нуклеарне технологије.

Утицај начина производње електричне енергије, дизел горива, бензина или природног гаса на емисију угљен-диоксида може се дефинисати преко стандардног емисионог фактора, SEF (Standard Emmission Factor), који се односи на емисију угљен-диоксида насталу директно од потрошње енергента или преко емисионог фактора животног циклуса, LCA (Life Cycle Assessment), који обухвата комплетан ланац производње горива (флотација угља из рудника или површинског копа, вађење нафте из нафтних поља, транспорт до термоелектране или рафинерије, прерада и транспорт до крајњег корисника).

Вредности SEF и LCA фактора исказане у тонама угљен-диоксида по мегават-часу произведене електричне енергије у земљама Европске уније приказане су на слици 8.1 [150].



Слика 8.1 SEF и LCA емисиони фактори угљен-диоксида приликом производње електричне енергије у земљама ЕУ

Различити емисиони фактори угљен-диоксида приликом производње електричне енергије у државама ЕУ доказују зависност од начина добијања електричне енергије. У државама као што су Грчка и Пољска, где се електрична енергија производи у термоелектранама из угља, емисија CO<sub>2</sub> је присутна у вишеструко већој мери у поређењу са Француском и Шведском, код којих се електрична енергија у високом проценту производи у хидро-електранама, нуклеарним постројењима или се у значајној мери користе обновљиви извори, као што су ветрогенератори и фото напонски панели. Код возила са моторима СУС, процес сагоревања је присутан током читавог времена рада возила, где се бензин, дизел гориво или КПП сагорева у цилиндрима мотора.

Са аспекта анализе настале емисије угљен-диоксида која потиче од аутобуса са моторима СУС (дизел или гасни), неопходно је анализирати емисије угљен-диоксида у свим фазама настанка, WTT и TTW. Највеће количине сирове нафте потичу из региона Средњег истока (Ирак, Иран, Саудијска Арабија и Сирија). Анализа емисије угљен-диоксида WTT за дизел гориво приказана је у табели 8.1 [151].

Табела 8.1 Емисија CO<sub>2</sub> од дизел горива, WTT (Well to Tank) [151]

| Дизел гориво           | Емисија CO <sub>2</sub><br>g·MJ <sup>-1</sup> |
|------------------------|---|
| Сирова нафта-вађење    | 5,3   |
| Сирова нафта-транспорт | 0,9   |
| Рафинерија-прерада     | 8,6   |
| Дистрибуција           | 1,0   |
| <b>Укупно</b>          | <b>15,8</b>                                   |

Познато је да један килограм дизел горива садржи око 0,861 килограма угљеника, односно око 86,1%. На основу једначине 8.1, произилази да сагоревањем 1 kg дизел горива настаје 3,16 kg угљен-диоксида, што представља емисију угљен диоксида која настаје у фази сагоревања у мотору возила, односно "од резервоара до точка" (TTW). Пошто један литар дизел горива има енергетску моћ од 36 MJ, ако се усвоји да је специфична тежина дизел горива 832 g·L<sup>-1</sup>, произилази да 1 kg дизел горива има енергетску моћ од 43,1 MJ [200]. Укупна емисија угљен-диоксида од "извора до точка" (WTW) која потиче сагоревањем дизел горива у возилима приказана је у табели 8.2 [151].

Табела 8.2 Емисија CO<sub>2</sub> од дизел горива, WTW (Well to Wheel)[151]

| Дизел гориво                    | Емисија CO <sub>2</sub><br>g·MJ <sup>-1</sup> |
|---------------------------------|---|
| WTT (од извора до резервоара)   | 15,8  |
| TTW (од резервоара до точка)    | 73,25   |
| <b>WTW (од извора до точка)</b> | <b>89,05</b>                                  |

Из табеле 8.2 произилази да је настала емисија угљен-диоксида CO<sub>2</sub> "од извора до точка" увећана за 21,5% у поређењу са емисијом од "резервоара до точка". Ако би се анализа од "извора до резервоара" (WTT) посматрала за Републику Србију, то би обухватило транспорт сирове нафте кроз Србију до рафинерије, прераду у дизел гориво и дистрибуцију до крајњег корисника. У том случају процењена

вредност емисије угљен-диоксида од "извора до резервоара" (WTT) била би око 10,4 g·MJ<sup>-1</sup>.

При овом сценарију, укупна емисија угљен диоксида од "извора до точка" (WTW) која потиче сагоревањем дизел горива у возилима приказана је у табели 8.3.

Табела 8.3 Емисија CO<sub>2</sub> од дизел горива, WTW (Well to Wheel) у Републици Србији

| Дизел гориво                    | Емисија CO <sub>2</sub><br>g·MJ <sup>-1</sup> |
|---------------------------------|---|
| WTT (од извора до резервоара)   | 10,4  |
| TTW (од резервоара до точка)    | 73,25   |
| <b>WTW (од извора до точка)</b> | <b>83,65</b>                                  |

У анализи која је представљена у табели 8.3, емисија угљен-диоксида од "извора до точка" (WTW) увећана је за 14,2% у односу на емисију од "резервоара до точка" (TTW).

Када је коришћење КПГ као погонског горива у питању код возила (аутобуса) може се урадити слична анализа као и у случају коришћења дизел горива. Специфичност анализе емисије CO<sub>2</sub> ако се посматра са аспекта "од извора до резервоара" (WTT) представља настала емисија у фази транспорта кроз гасовод. Дужина гасовода преко кога природни гас стиже у Европу из Сибира је око 7.000 km, односно око 4.000 km из региона средњег истока и југозападне Азије.

У зависности од дужине гасовода, емисија угљен-диоксида природног гаса "од извора до резервоара" (WTT-Well to Tank) приказана је у табели 8.4 [151].

Табела 8.4 Емисија CO<sub>2</sub> од КПГ, WTT (Well to Tank) [151]

| КПГ<br>(компримовани природни гас) | Дужина<br>гасовода<br>7.000 km<br>Емисија CO <sub>2</sub><br>g·MJ <sup>-1</sup> | Дужина<br>Гасовода<br>4.000 km<br>Емисија CO <sub>2</sub><br>g·MJ <sup>-1</sup> | Дужина<br>Гасовода<br>1.000 km<br>Емисија CO <sub>2</sub><br>g·MJ <sup>-1</sup> |
|------------------------------------|---|---|---|
| Природни гас -вађење               | 3,8   | 3,5   | 3,3   |
| Природни гас -транспорт            | 15,0  | 7,5   | 1,9   |
| Дистрибуција                       | 0,6   | 0,6   | 0,6   |
| Компримовање                       | 2,9   | 2,9   | 2,9   |
| <b>Укупно</b>                      | <b>22,3</b>   | <b>14,5</b>   | <b>8,7</b>  |

Очигледна је значајна разлика у величини емисије угљен-диоксида "од извора до резервоара" (WTT) која настаје у фази транспорта зависно из ког региона се снабдевају крајњи корисници у Европи. Природни гас чини у највећем проценту метан, око 95% уз присуство других угљоводоника и CO<sub>2</sub>. Коришћењем једначине 8.1, следи да сагоревањем једног килограма природног гаса настаје приближно 2,54 kg угљен-диоксида, што представља емисију угљен-диоксида "од резервоара до точка" (TTW).

Топотна моћ природног гаса изражена у MJ·m<sup>-3</sup> (Мега Џул по стандардном кубном метру природног гаса) је између 33 MJ·m<sup>-3</sup> и 38 MJ·m<sup>-3</sup> [18]. Ако је доња вредност топлотне моћи 33 MJ, а густина 0,732 kg·m<sup>-3</sup>, следи да је енергетска моћ природног гаса по килограму 45,1 MJ [152].

Укупна емисија угљен-диоксида која потиче од коришћења компримованог природног гаса код возила "од извора до точка" (WTW) приказана је у табели 8.5.

Табела 8.5 Емисија CO<sub>2</sub> од КПГ, WTW (Well to Wheel) [151]

| КПГ<br>(компримовани природни гас) | Дужина гасовода<br>7.000 km<br>Емисија CO <sub>2</sub><br>g·MJ <sup>-1</sup> | Дужина гасовода<br>4.000 km<br>Емисија CO <sub>2</sub><br>g·MJ <sup>-1</sup> | Дужина гасовода<br>1.000 km<br>Емисија CO <sub>2</sub><br>g·MJ <sup>-1</sup> |
|------------------------------------|--|--|--|
| WTT (од извора до резервоара)      | 22,3   | 14,5   | 8,7  |
| TTW (од резервоара до точка)       | 56,2   | 56,2   | 56,2   |
| <b>WTW (од извора до точка)</b>    | <b>78,5</b>  | <b>70,7</b>  | <b>64,9</b>  |

Из табеле 8.5 произилази да је емисија угљен-диоксида (CO<sub>2</sub>) "од извора до точка" (WTW), која настаје коришћењем КПГ, различита зависно од дужине транспорта гасоводом. У односу на емисију од "резервоара до точка" (TTW) увећана је за 15,4%, ако је дужина гасовода 1.000 km; 25,8% за дужину гасовода од 4.000 km; односно 39,6% у најнеповољнијем случају када је дужина гасовода 7.000 km.

У Републици Србији примарно је снабдевање природним гасом из Руске Федерације (Сибира). У 2017. години увезено је 2.183 милиона кубних метара природног гаса, а из домаће производње обезбеђено је 377 милиона кубних метара. Просечна дужина гасовода за транспорт природног гаса у Републику Србију је 2.459 km [153].

У Републици Србији типична вредност садржаја метана у природном гасу је 96%. Специфична тежина природног гаса за стандардни кубни метар гаса је 0,710 kg·m<sup>-3</sup>, а топлотна вредност је 33,5 MJ·m<sup>-3</sup> [154]. Анализом емисије угљен-диоксида (CO<sub>2</sub>) "од извора до точка" (WTW), која обухвата WTT и TTW анализу на територији Републике Србије, добили би се резултати како је приказано у табели 8.6.

Табела 8.6 Емисија CO<sub>2</sub> од КПГ, WTW (Well to Wheel) на територији Републике Србије

| КПГ<br>(компримовани природни гас) | Дужина гасовода<br>2.456 km<br>Емисија CO <sub>2</sub><br>g·MJ <sup>-1</sup> |
|------------------------------------|--|
| WTT (од извора до резервоара)      | 9,30   |
| TTW (од резервоара до точка)       | 53,84  |
| <b>WTW (од извора до точка)</b>    | <b>63,14</b>   |

Из табеле 8.6 произилази да је емисија "од извора до точка" (WTW) већа за 17,3% од емисије од "резервоара до точка" (TTW), када се користи КПГ као погонско гориво. Да би анализирали емисију угљен-диоксида (CO<sub>2</sub>) од стране возила на електрични погон у Републици Србији, потребно је израчунати емисионе факторе CO<sub>2</sub> који се односе на укупну производњу електричне енергије у Републици Србији.

У табели 8.7 представљени су подаци о производњи електричне енергије у 2015. години [62, 155, 156]. Подаци се могу сматрати репрезентативним јер је дужи низ година производња из термоелектрана (ТЕ) заступљена са око 70% а из хидроелектрана (ХЕ) са 30%, уз мала одступања.

Табела 8.7 Производња електричне енергије у Србији за 2015. годину [62, 155, 156]

|  | Јединица                    | Укупно-<br>ТЕ* | ХЕ**   | Укупно<br>ТЕ*+ХЕ** |
|--|-----------------------------|----------------|--------|--------------------|
| Произведена електрична енергија  | GWh                         | 25.017         | 10.599 | 35.616             |
| Укупна емисија CO <sub>2</sub>   | t                           | 26.743.398     |        | 26.743.398         |
| SEF-емисиони фактор CO <sub>2</sub>  | g·(kWh) <sup>-1</sup>       | 1.069          |        | 750                |
| <b>LCA<sub>CO2</sub> -емисиони фактор<br/>Производње електричне енергије</b> | <b>g·(kWh)<sup>-1</sup></b> | <b>1.102</b>   |        | <b>774</b>         |

\* термоелектране

\*\* хидроелектране

За формирање табеле 8.7 коришћене су вредности за термичку ефикасност на основу података о квалитету угља [156]. Термичка ефикасност за укупну производњу електричне енергије је фиктивна вредност израчуната као однос укупно произведене електричне енергије из термоелектрана и хидроелектрана подељен са садржајем хемијске енергије угља који се користи у термоелектранама. У прорачуну је такође узето да се око 3% енергије користи на вађење, припрему и транспорт угља [62].

Ради што објективније анализе WTW емисије угљен-диоксида која возила са електричним погоном индиректно продукују, треба узети у обзир поред LCA фактора емисије угљен-диоксида производње електричне енергије и губитке који настају у преносу и дистрибуцији електричне енергије од електрана до крајњег корисника.

У Републици Србији у 2018. години, губици у преносу електричне енергије су 2,14% а губици у дистрибутивној мрежи 12,16%, односно укупни губици су 14,30% [157]. Ако се изврши поређење са другим државама у Европи, види се да и тамо постоје велике варијације губитака електричне енергије посматрано по државама. У развијеним држава (Аустрија, Белгија, Немачка, Данска, Словенија) губици су између 4% и 6% [158].

У неким мање развијеним државама (Португал, Румунија, Хрватска, Турска, Црна Гора, Северна Македонија) у које се убраја и Република Србија губици су веома високи и крећу се између 10% и 20%, као вероватна последица краће електричне енергије у дистрибутивној мрежи, што се приказује као губитак [158].

За потребе анализе WTW емисије угљен-диоксида која возила са електричним погоном продукују као процењена реална вредност губитака у електро-енергетском систему Републике Србије усвојена је вредност од 7,5%.

### 8.3 Анализа TTW и WTW еколошких перформанси аутобуса на електрични погон у поређењу са аутобусима са погоном на дизел гориво и КПП у Београду

Анализа TTW (од резервоара до точка) и анализа WTW (од извора до точка) односи се на линију ЕКО 1 (Вуков споменик-Насеље Белвил) где су у раду аутобуси на електрични погон, како би се извршила упоредна анализа еколошких перформанси са аутобусима који користе дизел гориво или КПП и доказала *Хипотеза 4*.

На градској линији ЕКО 1 искључиво раде аутобуси на електрични погон Niger KLQ6125GEV3. Детаљна анализе потрошње електричне енергије Е-буса приказана је у тачкама 6.8.1, 6.8.2 и 6.8.3.

Мерење потрошње погонског горива за аутобусе стандардне дужине који користе дизел гориво и КПП, урађено је на основу праћења резултата потрошње дизел горива на аутобусима ИК-112N (ЕУРО 4) и КПП-а на аутобусима MAZ-203 CNG које је обављено у периоду 12.08.-5.10.2017. године, када је због инфраструктуралних радова у Рузвелтовој улици, привремено рад аутобуса на електрични погон био замењен са аутобусима са погоном на дизел гориво и аутобусима са погоном на КПП.

Просечна потрошња дизел горива у пролећно-јесењем периоду за аутобус ИК-112N износила је  $43,87 \text{ L} \cdot (100\text{km})^{-1}$  што је  $4,387 \text{ kWh} \cdot \text{km}^{-1}$ , док је аутобус са погоном на компримовани природни гас MAZ-203 CNG имао просечну потрошњу од  $46,70 \text{ kg} \cdot (100\text{km})^{-1}$  што је  $6,120 \text{ kWh} \cdot \text{km}^{-1}$  [13]. С обзиром да је Е-бус Niger KLQ6125GEV3 у пролећно-јесењем периоду рада остварио просечну потрошњу од  $1,237 \text{ kWh} \cdot \text{km}^{-1}$ , произилази да је енергетска ефикасност Е-буса 3,54 пута већа у односу на аутобус ИК-112N, односно 4,94 пута већа у поређењу са аутобусом MAZ-203 CNG.

Наведено поређење енергетске ефикасности између Е-буса, аутобуса са погоном на дизел гориво и аутобуса на КПП потврђује полазну *Хипотезу 2*, да аутобуси на електрични погон имају већу енергетску ефикасност у поређењу са аутобусима са погоном на дизел гориво и КПП, изражену у потрошеној енергији по јединици пређеног пута ( $\text{kWh} \cdot \text{km}^{-1}$ ).

Процена потрошње дизел горива и КПП-а током зимског периода рада добијена је на основу просечне вредности повећања потрошње која за аутобусе са погоном на дизел гориво износи око 5%, а за аутобусе на КПП око 7% у односу на пролећно-јесењи период рада [13].

Пример поређења процењене емисије штетних гасова и угљен-диоксида са становишта анализе TTW и WTW на линији ЕКО 1 аутобуса на електрични погон Niger KLQ6125GEV3, аутобуса са погоном на дизел гориво ИК-112N (ЕУРО 4) и аутобуса са погоном на компримовани природни гас MAZ-203 CNG у који је уграђен погонски агрегат Каминс (Cummins ISL G), који испуњава стандарде емисије издувних гасова 2010 EPA/CARB<sup>2</sup> и ЕУРО 6 [159], приказано је у табели 8.8.

---

<sup>2</sup> 2010 U.S Environmental Protection Agency (EPA) / California Air Resources Board (CARB)

Табела 8.8 Анализа ТТW и WTW за аутобусе различитих погонских система  
на линији ЕКО 1 у Београду

| Линија<br>ЕКО 1                       | Јединица   | Higer KLQ6125GEV3         |                |                | IK-112N                   |                |                | MAZ-203 CNG               |                |                |
|---------------------------------------|--|---------------------------|----------------|----------------|---------------------------|----------------|----------------|---------------------------|----------------|----------------|
|                                       |  | Пролећно-јесењи<br>период | Летњи период   | Зимски период  | Пролећно-јесењи<br>период | Летњи период   | Зимски период  | Пролећно-јесењи<br>период | Летњи период   | Зимски период  |
| Просечна<br>потрошња<br>елек.енергије | kWh·km <sup>-1</sup>                             | 1,237                     | 1,539          | 1,670          | -                         | -              | -              | -                         | -              | -              |
| Просечна<br>потрошња<br>дизел горива  | L·(100km) <sup>-1</sup><br>kWh·km <sup>-1</sup>  | -                         | -              | -              | 43,87<br>4,387            | 52,77<br>5,277 | 46,16<br>4,616 | -                         | -              | -              |
| Просечна<br>потрошња<br>КПГ           | kg·(100km) <sup>-1</sup><br>kWh·km <sup>-1</sup> | -                         | -              | -              | -                         | -              | -              | 46,70<br>6,120            | 53,85<br>7,057 | 49,95<br>6,546 |
| Емисија CO                            | g·km <sup>-1</sup>                               | -                         | -              | -              | 6,489                     | 7,805          | 6,828          | 7,009                     | 8,083          | 7,497          |
| Емисија CxHy                          | g·km <sup>-1</sup>                               | -                         | -              | -              | 0,892                     | 1,073          | 0,939          | 0,280                     | 0,323          | 0,300          |
| Емисија CH <sub>4</sub>               | g·km <sup>-1</sup>                               | -                         | -              | -              | -                         | -              | -              | 0,876                     | 1,010          | 0,937          |
| Емисија NO <sub>x</sub>               | g·km <sup>-1</sup>                               | -                         | -              | -              | 5,678                     | 6,830          | 5,974          | 0,473                     | 0,546          | 0,506          |
| Емисија PM <sub>10</sub>              | g·km <sup>-1</sup>                               | -                         | -              | -              | 0,049                     | 0,059          | 0,051          | 0,018                     | 0,020          | 0,019          |
| <b>Емисија CO<sub>2</sub><br/>ТТW</b> | <b>g·km<sup>-1</sup></b>                         | -                         | -              | -              | 1.153,8                   | 1.387,9        | 1.214,0        | 1.186,2                   | 1.367,8        | 1.268,7        |
| <b>Емисија CO<sub>2</sub><br/>WTW</b> | <b>g·km<sup>-1</sup></b>                         | <b>1.029,2</b>            | <b>1.280,5</b> | <b>1.389,5</b> | <b>1.317,6</b>            | <b>1.584,9</b> | <b>1.386,4</b> | <b>1.391,4</b>            | <b>1.604,4</b> | <b>1.488,2</b> |

За прорачун емисије CO, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub> и PM<sub>10</sub>, код аутобуса са погоном на дизел гориво и КПГ, коришћена је методологија UITP Environmental Cost Annex IV [152]. Прорачун емисија добијен је на основу улазних података о потрошњи дизел горива исказаног у L·(100km)<sup>-1</sup>, потрошњи КПГ у kg·(100km)<sup>-1</sup>, максималним вредностима емисије CO, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub> и PM<sub>10</sub> израженим у g·kWh<sup>-1</sup> зависно од типа погонског мотора, према тесту ETC TEST (Directive 2005/55/EC, European regulative no.595/2009) и специфичној потрошњи горива исказаној у g·kWh<sup>-1</sup>. Добијене вредности емисија CO, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub> и PM<sub>10</sub> представљају максималне очекиване вредности изражене у g·km<sup>-1</sup>.

Емисија угљен-диоксида (CO<sub>2</sub>) за аутобусе са погоном на дизел гориво и аутобусе на КПГ према ТТW анализи добијена је помоћу једначине 8.1, где је усвојено да је садржај угљеника у гориву  $g_c$ , за дизел гориво 0,862 (kg C)·(kg)<sup>-1</sup> и за КПГ 0,692 (kg·C)·(kg)<sup>-1</sup> [152]. Вредност емисије угљен-диоксида (CO<sub>2</sub>), ако се израчуна према WTW анализи, добијена је тако што је вредност емисије угљен- диоксида добијена ТТW анализом увећана за фактор увећања 14,2% за дизел гориво и 17,3% за КПГ, који су најреалнији за Републику Србију, како је приказано у табелама 8.3 и 8.6. Код аутобуса на електрични погон прорачун емисије CO<sub>2</sub> према WTW анализи добијен је помоћу формуле:

$$CO_{2WTW} = \frac{E_{ebusL}}{\eta_{ch}} \cdot LCA_{CO_2} \cdot f_{gpec} , \quad (8.2)$$

где је:

$CO_{2WTW}$  - емисија угљен-диоксида према WTW анализи, g·km<sup>-1</sup>,

- $E_{ebusL}$  - потрошња електричне енергије Е-буса,  $kWh \cdot km^{-1}$ ,  
 $\eta_{ch}$  - коефицијент ефикасности пуњача ( $\sim 0,95$ ),  
 $LCA_{CO_2}$  - емисиони фактор целокупног циклуса производње електричне енергије,  $g \cdot (kWh)^{-1}$ , табела 8.7,  
 $f_{gpee}$  - коефицијент губитака у преносу електричне енергије, усвојен 1,075.

Ако се узме у анализу TTW и WTW, рад аутобуса на линији ЕКО 1 током пролећно-јесењег, летњег и зимског периода рада где на линији ради 5 аутобуса и сваки остварује очекивани број пређених километара, респективно за сваки период 21.000 km, 15.750 km и 26.000 km, укупне вредности емисије штетних издувних гасова и угљен-диоксида приказани су у табели 8.9.

Табела 8.9 Збирна анализа TTW и WTW за аутобусе различитих погонских система на линији ЕКО 1 у Београду за пролећно-јесењи, летњи и зимски период рада

| Линија ЕКО 1                       | Јединица | Higer KLQ6125GEV3      |              |               | IK-112N                |              |               | MAZ- 203 CNG           |              |               |
|------------------------------------|----------|------------------------|--------------|---------------|------------------------|--------------|---------------|------------------------|--------------|---------------|
|                                    |          | Пролећно-јесењи период | Летњи период | Зимски период | Пролећно-јесењи период | Летњи период | Зимски период | Пролећно-јесењи период | Летњи период | Зимски период |
| Број возила у раду                 |          | 5                      | 5            | 5             | 5                      | 5            | 5             | 5                      | 5            | 5             |
| Број пређених километара           | km       | 21.000                 | 15.750       | 26.000        | 21.000                 | 15.750       | 26.000        | 21.000                 | 15.750       | 26.000        |
| Емисија CO                         | kg       | -                      | -            | -             | 681,3                  | 614,7        | 887,6         | 736,0                  | 636,5        | 974,6         |
| Емисија CxHy                       | kg       | -                      | -            | -             | 93,7                   | 84,5         | 122,0         | 29,4                   | 25,5         | 39,0          |
| Емисија CH <sub>4</sub>            | kg       | -                      | -            | -             | -                      | -            | -             | 92,0                   | 79,6         | 121,8         |
| Емисија NO <sub>x</sub>            | kg       | -                      | -            | -             | 596,2                  | 537,8        | 776,6         | 49,7                   | 43,0         | 65,8          |
| Емисија PM <sub>10</sub>           | kg       | -                      | -            | -             | 5,1                    | 4,6          | 6,7           | 1,8                    | 1,6          | 2,4           |
| <b>Емисија CO<sub>2</sub>, TTW</b> | <b>t</b> | -                      | -            | -             | <b>121,1</b>           | <b>109,3</b> | <b>157,8</b>  | <b>124,5</b>           | <b>107,7</b> | <b>164,9</b>  |
| <b>Емисија CO<sub>2</sub>, WTW</b> | <b>t</b> | <b>108,1</b>           | <b>100,8</b> | <b>180,6</b>  | <b>138,3</b>           | <b>124,8</b> | <b>180,2</b>  | <b>146,1</b>           | <b>126,3</b> | <b>193,5</b>  |

Из табеле 8.9 се виде еколошки ефекти рада Е-буса Higer KLQ6125GEV3 на линији ЕКО 1 у поређењу са радом аутобуса са погонем на дизел гориво и КПП. Ако се анализира TTW, Е-бус има нулту емисију штетних гасова односно нема емисије CO, CxHy, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub> и CO<sub>2</sub>. Квантификовани износи емисија CO, CxHy, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub> од стране аутобуса који користе дизел гориво или КПП у случају њиховог рада на линији ЕКО 1, представљају ефекте примене Е-буса на линији ЕКО 1, где се неће наведена количина штетних материја реализовати, чиме је доказан део *Хипотезе 4*.

У летњем периоду рада потрошња дизел горива и КПП је највећа због утицаја рада система за хлађење на тим возилима [13]. Код Е-буса потрошња електричне енергије је значајно већа него у пролећно-јесењем периоду, али је мања него у зимском периоду.

Емисија угљен-диоксида (CO<sub>2</sub>) са аспекта WTW анализе у прелазном и летњем периоду рада доказује да Е-бус има нижи ниво емисије CO<sub>2</sub> у поређењу са аутобусима који користе дизел гориво и аутобусима који користе КПП. Емисија CO<sub>2</sub> од стране Е-буса у пролећно-јесењем периоду рада је за 21,8% нижа у поређењу са аутобусима са погонем на дизел гориво и за 26,0% нижа у поређењу



са аутобусима са погоном на КПП. У летњем периоду рада емисија CO<sub>2</sub> код аутобуса на електрични погон нижа је за 19,2% у односу на аутобус са погоном на дизел гориво и за 20,1% у односу на аутобус са погоном на КПП, чиме је доказан део *Хипотезе 4*.

У поглављу 6 дисертације детаљно је анализирана потрошња Е-буса NigeR KLQ6125GEV3 током рада у прелазном, летњем и зимском периоду на линији ЕКО 1. Доказано је да је највећа потрошња електричне енергије током зимског периода због утицаја рада система за грејање (Поглавље 6, тачка 6.8.3). То намеће потребу за WTW анализу емисије угљен-диоксида и поређење са аутобусима са погоном на дизел гориво и КПП током рада у зимском периоду.

На основу резултата из табела 8.8 и 8.9 следи да је емисија CO<sub>2</sub> од стране аутобуса на електрични погон ако се посматра само зимски период рада нешто већа у поређењу са емисијом CO<sub>2</sub> која настаје од аутобуса са погоном на дизел гориво, за Е-бус је 1.389,5 g·km<sup>-1</sup> а за аутобус на дизел гориво 1.386,4 g·km<sup>-1</sup>, из чега следи да током зимског периода рада због интензивног коришћења система за грејање код Е-буса који значајно повећава потрошњу електричне енергије возила у целини нема ефекта смањења емисије угљен-диоксида CO<sub>2</sub> у поређењу са аутобусима на дизел погон. У зимском периоду рада ако је очекивани број пређених километара 26.000 km, емисија CO<sub>2</sub> од стране аутобуса на електрични погон је 180,6 t док је емисија CO<sub>2</sub> од стране аутобуса који користи дизел гориво 180,2 t. У односу на аутобусе који користе КПП који током зимског периода имају емисију CO<sub>2</sub> од 1.488,2 g·km<sup>-1</sup>, емисија од стране Е-буса је и даље мање за 6,6%. Ефекти рада аутобуса различитих погонских система на остварену емисију штетних гасова и угљен-диоксида на линији ЕКО 1, на годишњем нивоу приказани су у табели 8.10 на основу добијених резултата из табела 8.9.

Табела 8.10 Збирна анализа TTW и WTW за аутобусе различитих погонских система на линији ЕКО 1 у Београду, (годишњи период рада)

| Линија ЕКО 1                          | Јединица                 | NigeR KLQ6125GEV3 | IK-112N      | MAZ-203 CNG  |
|---------------------------------------|--------------------------|-------------------|--------------|--------------|
| Број возила у раду                    |                          | 5                 | 5            | 5            |
| Број пређених километара              | km                       | 62.750            | 62.750       | 62.750       |
| Просечна потрошња електричне енергије | kWh·km <sup>-1</sup>     | 1,493             |              |              |
| Просечна потрошња дизел горива        | L·(100km) <sup>-1</sup>  |                   | 47,05        |              |
| Просечна потрошња КПП                 | kg·(100km) <sup>-1</sup> |                   |              | 49,84        |
| Емисија CO                            | kg                       | -                 | 2.183,6      | 2.347,1      |
| Емисија CxHy                          | kg                       | -                 | 300,2        | 93,9         |
| Емисија CH <sub>4</sub>               | kg                       | -                 | -            | 293,4        |
| Емисија NO <sub>x</sub>               | kg                       | -                 | 1.910,6      | 158,5        |
| Емисија PM <sub>10</sub>              | kg                       | -                 | 16,4         | 5,8          |
| <b>Емисија CO<sub>2</sub>, TTW</b>    | <b>t</b>                 | <b>-</b>          | <b>388,2</b> | <b>397,1</b> |
| <b>Емисија CO<sub>2</sub>, WTW</b>    | <b>t</b>                 | <b>389,5</b>      | <b>443,3</b> | <b>465,9</b> |

Из табеле 8.10 произилази да аутобуси на електрични погон Higer KLQ6125GEV3 који раде на линији ЕКО 1 на годишњем нивоу имају индиректни утицај на животну средину посматрано на макро-нивоу (Република Србија) кроз емисију од 389,5 тоне угљен-диоксида који настаје у производњи електричне енергије.

У поређењу са емисијом угљен-диоксида која потиче од аутобуса са погоном на дизел гориво посматрано на државном нивоу (анализа WTW), која износи 443,3 тоне, произилази да је код аутобуса на електрични погон мања за 12,1%. Још повољнији случај је анализа емисије CO<sub>2</sub> у поређењу са аутобусима на КПП где је код аутобуса на електрични погон мања за 16,4%.

Добијене вредности емисије CO<sub>2</sub> (анализа WTW), доказују део полазне *Хипотезе 4* да аутобуси на електрични погон имају повољнију емисију угљен-диоксида CO<sub>2</sub> у поређењу са аутобусима са погоном на дизел гориво и КПП.

#### 8.4 Мерење емисије буке Е-буса Higer KLQ6125GEV3

Аутобуси за јавни градски транспорт у градовима представљају значајан извор буке посебно у централним градским зонама. Бука настаје као последица рада: погонског агрегата, трансмисије, издувног система, пнеуматика, помоћних система на возилу.

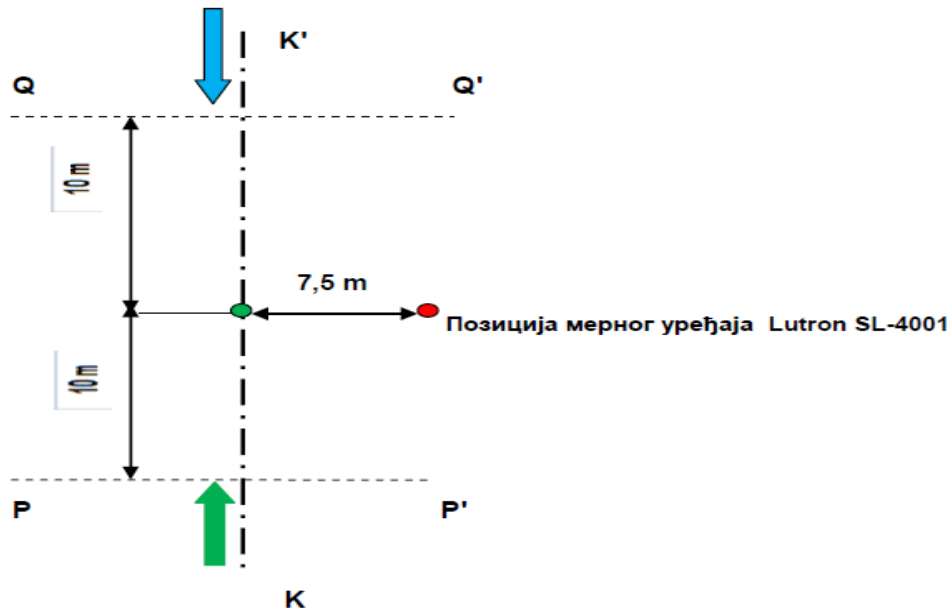
Смањење нивоа емитоване буке од возила за јавни транспорт је стални циљ који се од органа управе градова поставља према компанијама које врше јавни превоз. Увођење аутобуса на електрични погон је један од могућих начина смањења буке.

Мерење емисије емитоване буке код Е-буса Higer KLQ6125GEV3 обављена је на полигону у складу са правилником UN ECE 51P, помоћу дигиталног мерног уређаја Лутрон (Lutron SL-4001 Digital sound level meter). Изглед мерног уређаја Lutron SL-4001, радне карактеристике и полигон приказани су у Прилогу 4.

Измерена вредност емитоване буке када је возило у мировању је 63,1 dB. Мерни уређај је био постављен на растојању од 0,5 m од средине возила посматрано са леве стране возила. Мерене су вредности емитоване буке од Е-буса у покрету при брзинама кретања од 30 km·h<sup>-1</sup> и 40 km·h<sup>-1</sup>.

Мерни уређај Lutron SL-4001 се поставља на удаљеност од 7,5 m од референтне линије К-К'' која представља правац вожње Е-буса, како је приказано на слици 8.2. Уређај је постављен на трonoшцу на висину од 1,2 m изнад земље и гледа у хоризонталном правцу ка референтној линији кретања.

На полигону су означене две линије Р-Р' и Q-Q' на растојању од 10 m испред и иза положаја мерног уређаја. Е-бус се убрзава до жељене брзине до линије Р-Р' након чега одржава константну брзину кретања, до тренутка када задњи део аутобуса пролази линијом Q-Q'.



Слика 8.2 Скица полигона за мерење емисије буке

Мерење нивоа емитоване буке се врши и у супротном смеру К'-К' (плава стрелица) на идентичан начин како би се добиле вредности емитоване буке за леву и десну страну Е-буса. Вредности измерених нивоа буке који су имали највећу међусобну хомогеност, приказани су у табели 8.11.

Табела 8.11 Ниво емисије буке Е-буса Niger KLQ6125GEV 3, у возњи

| Страна аутобуса                     | Број мерења | Брзина, 30 km·h <sup>-1</sup><br>dB | Брзина, 40 km·h <sup>-1</sup><br>dB |
|-------------------------------------|-------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| лева                                | 1.          | 67,4                                | 70,4                                |
|                                     | 2.          | 67,5                                | 70,5                                |
|                                     | 3.          | 67,4                                | 70,3                                |
| десна                               | 1.          | 67,2                                | 69,8                                |
|                                     | 2.          | 67,1                                | 69,8                                |
|                                     | 3.          | 67,2                                | 69,6                                |
| <b>Просечна вредност мерења, dB</b> |             | <b>67,3</b>                         | <b>70,0</b>                         |

Из табеле се закључује да ниво емитоване буке Е-буса у правцу К'-К (лева страна Е-буса) има нешто веће вредности. Код Е-буса погонски електромотори, преносник снаге, карданско вратило и главни преносник са диференцијалом су централно постављени у задњем делу међуосовинског растојања пре погонске осовине тако да се емитована бука од наведених компоненти равномерно емитује на обе стране возила. Положај помоћних електромотора за погон компресора и хидропогона налазе се са леве стране возила у боксевима који се налазе пре погонске осовине, па је њихов рад утицао да ниво измерене буке у правцу К'-К (лева страна Е-буса) буде нешто већи. Просечни ниво емитоване буке при брзини од 40 km·h<sup>-1</sup> већи је за 2,7 dB у односу на брзину кретања од 30 km·h<sup>-1</sup>.

За поређење резултата измерене емисије буке аутобуса на електрични погон Niger KLQ6125GEV3 са аутобусима са погоном на дизел гориво користиће се резултати мерења емисије буке, мерене на аутобусу са погоном на дизел гориво MAZ-203 (ЕУРО 5) што је приказано у табели 8.12 [160].

Табела 8.12 Ниво емисије буке дизел аутобуса MAZ-203 у возњи

| Страна аутобуса              | Број мерења | Брзина, 30 km·h <sup>-1</sup><br>dB | Брзина, 40 km·h <sup>-1</sup><br>dB |
|------------------------------|-------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| лева                         | 1.          | 76,6                                | 76,6                                |
|                              | 2.          | 76,3                                | 77,0                                |
| десна                        | 1.          | 74,5                                | 73,5                                |
|                              | 2.          | 75,9                                | 74,4                                |
| Просечна вредност мерења, dB |             | 75,6                                | 75,4                                |

Очигледно је да измерени нивои буке код Е-буса Higer KLQ6125GEV3 при брзинама 30 km·h<sup>-1</sup> и 40 km·h<sup>-1</sup> имају значајно мање вредности од вредности емисије буке код аутобуса са дизел погоном MAZ-203. При брзини од 30 km·h<sup>-1</sup> ниво измерене буке код аутобуса на електрични погон је нижи за 10,9% а при брзини од 40 km·h<sup>-1</sup> за 7,1% у односу на аутобус са дизел погоном, чиме је доказан део полазне *Хипотезе 4*, да аутобуси на електрични погон имају нижи ниво емитоване буке у поређењу са аутобусима са погоном на дизел гориво.

Поређење резултата измерене емисије буке аутобуса на електрични погон Higer KLQ6125GEV3 са аутобусима на КППГ, користиће се резултати мерења емисије буке, мерене на аутобусу MAZ-203 CNG (ЕУРО 6) што је приказано у табели 8.13 [160].

Табела 8.13 Ниво емисије буке аутобуса на КППГ, MAZ-203 CNG у возњи

| Страна аутобуса              | Број мерења | Брзина, 30 km·h <sup>-1</sup><br>dB | Брзина, 40 km·h <sup>-1</sup><br>dB |
|------------------------------|-------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| лева                         | 1.          | 75,8                                | 71,0                                |
|                              | 2.          | 76,3                                | 72,6                                |
| десна                        | 1.          | 69,4                                | 70,7                                |
|                              | 2.          | 71,2                                | 71,8                                |
| Просечна вредност мерења, dB |             | 73,1                                | 71,5                                |

И код поређења измереног нивоа емитоване буке код Е-буса Higer KLQ6125GEV3 и аутобуса MAZ-203 CNG при брзинама 30 km·h<sup>-1</sup> и 40 km·h<sup>-1</sup>, Е-бус има нижи ниво емисије буке. При брзини од 30 km·h<sup>-1</sup> ниво измерене буке код аутобуса на електрични погон је нижи за 8,6% а при брзини од 40 km·h<sup>-1</sup> за 2,1% у односу на аутобус са погоном на КППГ, чиме је доказан део *Хипотезе 4*, да аутобуси на електрични погон имају нижи ниво емитоване буке у поређењу са аутобусима са погоном на КППГ.

## 8.5 Рециклажа аутобуса на електрични погон

Аутобуси на електрични погон, као и остала моторна возила имају свој животни век, односно животни циклус (Life-Cycle). Генерално сви производи па тако и возила-аутобуси у свим својим животним фазама које обухватају: производњу, експлоатацију и расход возила, генеришу отпадни материјал, који је потребно прерадити и дати му могућност поновне употребе. Специфичности аутобуса на електрични погон јесте знатно веће присуство електронског отпада (Electronic waste) и опасног отпада (hazardous substances) у односу на конвенционалне аутобусе који потиче пре свега од литијумских батерија. Можемо сматрати да рециклирање аутобуса на електрични погон подразумева највећи број радњи које се предузимају као код рециклаже тролејбуса, трамваја и аутобуса. Аутобуси на

електрични погон у процесу рециклирања имају и електронски отпад. Електронски отпад се у земљама Европске уније дефинише као електронска и електрична опрема, склопови и саставни делови који настају у привреди (индустрија, занатство и слично) и електронски отпад из домаћинства и услужних делатности [161].

Једна од специфичности електронског отпада уопште па тако и од возила, јесте његова сложеност, присуство различитих материјала (метали, металоиди, племенити материјали, пластика...) и брзина застаревања што намеће коришћење нових савременијих делова и компоненти. Из тих разлога рециклажа електронског отпада добија на великом значају, како због његовог правилног третмана и утицаја на животну средину тако и због издвајања исправних електронских компоненти, племенитих и ретких материјала чији су ресурси у природи често веома ограничени. Штетне материје које су присутне у електронском отпаду су: олово (Pb), кадмијум (Cd) и њихова једињења, жива (Hg), баријум (Ba), арсен (As), органски халогениди и др. Њихов утицај на здравље људи веома је негативан и узрокују бројна обољења централног нервног система, бубрега, јетре, имуног система и изазивачи су канцерогених обољења.

На аутобусима на електрични погон електронски и опасни отпад чине:

- вучни мотори (намотаји статора, ротора, магнети...),
- литијумске батерије и суперкондензатори за складиштење електричне енергије,
- електронске компоненте разних система на возилу: систем за пуњење, систем за управљање, систем за вучу, инвертори, претварачи, конвертори, дисплеј, системи за грејање и хлађење, инструмент табла.

Најважније директиве и прописи који се односе на електронски и опасни отпад су:

- Директива WEEE-Waste Electrical & Electronic Equipment, EC/249/2004, која се односи на електрични и електронски отпад. Директива прописује обавезу да произвођачи електричних уређаја морају третирати електричне и електронске уређаје након истека њиховог животног века, кроз сакупљање, обнављање и рециклажу електричног отпада.
- Директива 2002/95/EC (Directive 2002/95/EC) или како се често назива Директива о ограничењима за употребу опасних материја, (RoHS-Restriction of the use of hazardous substances) допуњује WEEE Директиву дефинисањем максималних количина потенцијално опасних материјала садржаних у електронским и електричним уређајима, које се односе пре свега на: олово, живу, кадмијум, шестовалентни хром, полибромни бифенил и полибромни бифенил етри.
- Директива о батеријама 2006/66/EC (Directive 2006/66/EC) усвојена 2006. године којом се захтева примена у националним законодавствима земаља чланица ЕУ. Циљ директиве је стално повећавање степена рециклирања истрошених батерија и повраћаја ретких и племенитих материјала у поновну производњу. Директива о батеријама прописује да произвођачи, дистрибутери или увозници батерија допринесу трошковима третмана батерија (одговорност за производ, одговорност за прикупљање и одлагање батерија).

У ЈКП ГСП "Београд", аутобуси, тролејбуси и трамваји, аспекта рециклирања, прате се током експлоатационог века у циљу третмана замењених делова и радних флуида.

Аутобуси, тролејбуси и трамваји којима је истекао животни циклус од момента повлачења из редовног саобраћаја пролазе следеће фазе [162].

- записник техничке комисије о стању возила са предлогом за расход,
- одлука о расходу возила,
- одстрањивање радних флуида у прописане посуде и места: гориво, моторно уље, хипоидно уље, антифриз...,
- скидање делова и склопова која се могу поново користити (врата, стакла, поклопци, опрема мотора, вентилатори, сигнализација, седишта, рукодржачи...),
- скидање агрегата: мотор, мењач, осовине...,
- јавна лицитација за продају преосталог дела аутобуса, откуп од стране појединца или предузећа,
- сечење, дробљење и млевење у постројењу за рециклажу.



Слика 8.3. Аутобус ЈКП ГСП "Београд", фаза скидања делова

Поступање са отпадним материјалима регулисано је Правилником о поступању са отпадним материјалима у ЈКП ГСП "Београд" [163]. Овим правилником се регулише начин прикупљања, разврставање и складиштење отпада који настаје у радионицама за одржавање возила.

Под отпадом у смислу овог правилника подразумевају се: отпадни лим до 5 mm дебљине, отпадно гвожђе преко 5 mm дебљине, отпадни сиви лив, гвоздена струготина, отпадни бакар, отпадни каблови, отпадни хладњаци, отпадна бронза, отпадни месинг, отпадни алуминијум, алуминијумски каблови, отпадно стакло, отпадно дрво, отпадна гума (пнеуматици, јастуци, кедери), пластична отпадна амбалажа, шасије расходованих возила, расходовани мотори СУС, расходовани електромотори, расходовани ретардери, расходовани електрични склопови, расходовани мењачи и погонски мостови.

Опасни отпад мора имати посебан третман, који је такође прописан правилником [163].

У опасни отпад спадају:

- отпадна моторна уља,
- истрошени оловни акумулатори и батерије,
- истрошени никл-кадмијумски акумулатори и батерије,

- електронски отпад – од електричних и електронских производа (монитори, системи за хлађење и грејање, ИТ опрема, штампачи, флуоцеви и сијалице које садрже живу и сл),
- метална контаминирана амбалажа (од уља, мазива, антифриза),
- пластична контаминирана амбалажа (од уља, мазива, антифриза),
- зауљени пуцвали и крпе,
- отпадни филтери за уља и горива,
- зауљени песак и пиљевина,
- отпад из сепаратора за одвајање масти и уља,
- отпадни антифриз,
- отпадна прашина.

Пример сакупљања отпадног бакра од намотаја расходованих електромотора од трамваја и тролејбуса на предвиђеном месту у ЈКП ГСП "Београд" приказан је на слици 8.4.



*Слика 8.4 Прикупљање намотаја бакра из расходованих електромотора трамваја и тролејбуса у ЈКП ГСП "Београд"*

Савремене тендерске процедуре куповине аутобуса на електрични погон у Европи [164], посебно аутобуса који користе литијумске батерије, остављају могућност да изабрани произвођач аутобуса на електрични погон буде "власник" батерија и да комплетан третман батерије у животном веку (сервис или замена у случају отказа) и након истека животног века буде у његовој надлежности (преузимање истрошене батерије, складиштење, транспорт, рециклажа) што се може регулисати посебним анексом у тендерској документацији са корисником возила.

## 9. ЕКОНОМСКИ АСПЕКТИ РАДА АУТОБУСА НА ЕЛЕКТРИЧНИ ПОГОН

Анализа економских аспеката рада аутобуси на електрични погон који се користе у јавном градском транспорту значајна је ради сагледавања укупних трошкова који су карактеристични за овај концепт градског аутобуса и поређења са другим концептима, пре свега са аутобусима који користе дизел гориво или КПП. Поред енергетских и еколошких аспеката рада, економска анализа је значајна за доношење одлуке о увођењу аутобуса на електрични погон, посебно са аспекта исплативости пројекта и висине инвестиционих трошкова које је потребно обезбедити. Такође економска анализа је важан критеријум у вредновању најбољег решења у избору концепта возила за рад на некој линији јавног градског транспорта. Ради што бољег сагледавања укупних трошкова који се јављају у експлоатацији аутобуског подсистема и поређења различитих погонских конфигурација које могу бити предмет поређења најважнији су трошкови: инвестиција, енергије, одржавања и екологије. Поред наведених материјалних трошкова, треба обухватити и трошкове плата за возаче, раднике одржавања и остале запослене. У дисертацији се анализирају само материјални трошкови.

### 9.1 Инвестициони трошкови

#### **А) Трошкови набавке возила**

Код аутобуса на електрични погон инвестициони трошкови подразумевају набавку возила, пуњача и ако је потребно инфраструктурне радове који се односе на обезбеђивање потребног напајања пуњача електричном енергијом. Генерално посматрано цене аутобуса на електрични погон значајно су веће од цене аутобуса са погоном на дизел гориво или КПП и могу да буду различите зависно од техничких карактеристика возила, уграђених компоненти, примењеног система складиштења електричне енергије, тендерских услова и зависно од држава где се производе и где су у употреби. Цене стандардних 12-метарских аутобуса на електрични погон из 2014. године на почетку њихове значајније примене приказане су табели 9.1 [45].

Табела 9.1 Цене Е-бус и дизел аутобуса по регионима света\*

| Регион света    | Цена Е-бус<br>\$ | Цена дизел аутобуса<br>\$ |
|-----------------|------------------|---------------------------|
| Кина            | 280.000-350.000  | 60.000-90.000             |
| Русија          | 400.000-500.000  | 130.000-180.000           |
| Европа          | 575.000-680.000  | 250.000-350.000           |
| Северна Америка | 595.000-690.000  | 300.000-400.000           |

\*Извор: Frost&Sullivan, Strategic of Global Hybrid and Electric Heavy-Duty Transit Bus Market,08/13; based on regional price in USD 2012.

Очигледна је велика дисперзија цена аутобуса на електрични и дизел погон зависно од региона света где се возила производе. Возила из Кине имају вишеструко ниже цене у поређењу са аутобусима из Европе и Америке. То се може објаснити чињеницама да возила произведена у Кини која се користе на кинеском тржишту нису у обавези да испуњавају веома високе критеријуме хомологације који се примењују у Европи у погледу техничких, безбедносних, еколошких, ергономски и аспеката комфора. У том смислу у дисертацији биће узета у обзир



само возила која испуњавају директиве и правилнике који се примењују у Европској Унији и Републици Србији. Према подацима из 2014. године цене аутобуса различитих погонских система на тржишту Европске Уније приказани су у табели 9.2 [83, 165].

Табела 9.2 Цене соло аутобуса различитих погонских система у ЕУ

| Врста аутобуса (12m)                     | Набавна цена, € |
|--|-----------------|
| Дизел (Еуро V)                           | 225.000         |
| Дизел (Еуро VI)                          | 240.000         |
| Дизел-хибрид (ЕЕV)                       | 300.000         |
| Чисто електрични ("пантографско" пуњење) | 500.000         |
| Чисто електрични ("ноћно" пуњење)        | 400.000         |

Из табеле 9.2 произилази да су аутобуси на електрични погон приближно дупло скупљи од аутобуса са погоном на дизел гориво и за 1,5 пута скупљи од аутобуса са хибридном погоном.

Када је у питању поређење цене аутобуса на електрични погон и аутобуса на КПГ, познато је да је цена стандардног аутобуса на КПГ већа од цене дизел аутобуса између 10% и 25% [166], односно може се усвојити просечна цена од 265.000 €.

Цена аутобуса на електрични погон највише зависи од примењеног система за складиштење електричне енергије, односно типа и капацитета батерије или суперкондензатора. У том смислу цену Е-буса је могуће исказати следећом формулом:

$$T_{ebus} = T_{bbus} + C_{bus} \cdot T_{bus} , \tag{9.1}$$

где је:

$T_{ebus}$  - цена Е-буса, €,

$T_{bbus}$  - цена Е-буса без батерије или суперкондензатора, €,

$C_{bus}$  - капацитет батерије или суперкондензатора, kWh,

$T_{bus}$  - јединична цена батерије или суперкондензатора, €·kWh<sup>-1</sup>.

Цене аутобуса на електрични погон зависно од врсте и типа батерије према подацима из истраживања обављеним 2016. године у Финској [167], представљено је у табели 9.3.

Табела 9.3 Цене Е-буса у зависности од типа и капацитета батерије

| Е-бус, тип батерије                                     | Капацитет батерије kWh | Цена                     |
|---|------------------------|--------------------------|
| Е-бус без батерије или суперкондензатора [ $T_{bbus}$ ] |                        | 360.000 €                |
| Споро пуњење, тип батерије LFP (литијум-ферофосфат)     | од 324 до 425          | 500 €·kWh <sup>-1</sup>  |
| Брзо пуњење, тип батерије LTO (литијум-титан)           | од 80 до 100           | 1200 €·kWh <sup>-1</sup> |

Према наведеном истраживању цена Е-буса у који су уграђене LFP (литијум-ферофосфат) батерије износи око 485.000 €, док је Е-бус који користи LTO (литијум-титан) батерије има приближну цену од 456.000 €. Тренутно велики број аутобуса на електрични погон који се пуне преко ноћи опремљени су LFP (литијум-ферофосфат) батеријама које имају капацитет од 324 kWh, 375 kW и 425 kWh, тако да је цена тих Е-бусева између 520.000 € и 572.500 €. Соло аутобуси са брзим пуњењем који користе LTO (литијум-титан) батеријама најчешће имају

капацитет од 80 kWh до 100 kWh, тако да је цена овог типа Е-буса између 456.000 € и 480.000 €. Код електричних аутобуса који користе суперкондензатор као систем за складиштење електричне енергије, цена самог суперкондензатора капацитета 32 kWh износи 90.000 € [168], што је приближно око  $2.812 \text{ €}\cdot\text{kWh}^{-1}$ . Према истом извору у Кини цена LTO (литијум-титан) батерије је  $1.000 \text{ €}\cdot\text{kWh}^{-1}$ . ЈКП ГСП "Београд" је 2016. године је извршио набавку 5 соло аутобуса на електрични погон Хигер (Higer KLQ6125 GEV3) који користи суперкондензатор капацитета 20 kWh. Јединична цена возила износила је 453.610 € [169].

### **Б) Трошкови набавке пуњача**

Пуњачи за аутобусе на електрични погон обезбеђују пуњење батерија или суперкондензатора електричном енергијом. Цене пуњача су различите зависно од снаге пуњења односно количине електричне енергије које могу да испоруче посматрано у неком временском периоду. Цена пуњача за споро пуњење снаге 80 kW је око 50.000 € [167], односно 30.000 € за пуњач снаге од 40 kW [169]. Пуњачи за брзо пуњење имају значајно веће снаге пуњења од спорих пуњача. Цена пуњача за брзо пуњење снаге од 150 kW је 95.000 € [169] док је цена пуњача велике снаге (најчешће од 360 kW до 380 kW) у просеку око 180.000 € [170]. На тржишту постоје и пуњачи са још већом снагом пуњења од 500 kW до 600 kW (произвођачи "Јема", АВВ,...) чија је цена између 350.000 € и 400.000 € [170]. Број пуњача које је потребно набавити зависи од броја аутобуса на електрични погон који ће бити у раду и капацитета батерије. Код аутобуса са спорим пуњењем пуњач од 80 kW може да опслужи максимално 2 аутобуса. Ако се користи пуњач од 40 kW, за сваки аутобус је потребно обезбедити по један пуњач. Код брзог пуњења на линији где раде аутобуси на електрични погон потребно је обезбедити најмање 2 брза пуњача на 10 Е-буса у раду [100,171].

### **В) Трошкови инфраструктуре**

Трошкови инфраструктуре за примену Е-буса пре свега подразумевају трошкове постављања и повезивања брзих пуњача са трафостаницом. У том смислу пожељно је да положај пуњача буде што ближе позицији трафостанице како би трошкови копања рова за полагање кабла и трошкови самог енергетског кабла били што мањи. Цена енергетског кабла 10 kV са уградњом којим се пуњач повезује са трафо станицом је око  $100 \text{ €}\cdot\text{m}^{-1}$  [172]. У случају да је потребно изградити и трафо станицу снаге од 1 MW, трошкови се увећавају за око 66.000 € [172].

Код аутобуса на КПП трошкови инфраструктуре су: изградња станице за пуњење аутобуса са КПП, адаптација радног простора за одржавање аутобуса на КПП који су опремљени сигурносном опремом за детекцију метана у радном простору и посебним електро инсталацијама и опремом која спречава појаву варничења. Изградња једне станице за брзо пуњење аутобуса са погоном на КПП која је опремљена са 2 компресора снаге по 250 kW који могу да остваре капацитет компримовања и пуњења природног гаса од  $3.000 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$  износи 1.714.000 € [173]. Адаптација простора са 4 радна канала за одржавање аутобуса на КПП процењена је на 398.623 € [173].

Сигурносна опрема за детекцију метана, електро инсталације и опрема која спречава појаву варничења износи око 70.000 € као и специјални алати за одржавање возила око 25.000 € [174]. Додатни трошак може настати ако у депоу где се гради станица за КПП нема довољно електричне енергије за рад

електромотора компресора па је потребна градња нове трафостанице или у случају да гасовод не пролази поред локације станице па је потребно повезивање са гасоводом.

### **Г) Остали инвестициони трошкови**

У ову групу трошкова се убрајају трошкови транспорта возила од произвођача до крајњег корисника, трошкови обуке за запослене, трошкови набавке дијагностичке опреме и специфичних алата и трошкови царине. На примеру набавке 5 соло аутобуса на електрични погон Хигер (Higer KLQ6125 GEV3) коју је ЈКП ГСП "Београд" реализовао 2016. године, наведени "остали" трошкови износили су 76.900 € [169], што је око 15.380 € по возилу. Трошкови транспорта возила из Кине имали су највећи удео у износу ових трошкова.

## **9.2 Оперативни трошкови**

Оперативне трошкове чине: трошкови редовног сервисирања према прописаној технологији произвођача, трошкови корективног одржавања, трошкови замене пнеуматика, трошкови електричне енергије за погон возила, трошкови електричне енергије, воде и хемикалија за чишћење возила, индиректни трошкови од емисије угљен-диоксида (CO<sub>2</sub>) која настаје у фази производње електричне енергије (WTW анализа), трошкови обавезног и "каска" осигурања возила и трошкови приспелих кредитних обавеза (ануитета). У ове трошкове спадају и трошкови замене сета батерија или суперкондензатора који могу настати током експлоатационог века возила, с обзиром да је у овом тренутку реални век рада батерије краћи од животног века возила и неопходна је најмање једна замена сета батерије. Суперкондензатори имају животног век који се поклапа са животног веком самог возила али је потребно извршити сервис после 10 година рада.

### **А) Трошкови одржавања**

Одржавање аутобуса на електрични погон обавља се према технологији одржавања која се битно разликује од одржавања аутобуса са СУС моторима. Специфичности одржавања аутобуса на електрични погон карактеришу [139 ]:

- једноставније одржавање, с обзиром на значајно мањи број "позиција" које су предмет одржавања,
- виталне компоненте возила (инвертори, конвертори, претварачи, суперкондензатор) су модуларног типа,
- краће време потребно за замену,
- јефтиније одржавање у поређењу са дизел или аутобусима на КПП.

У табели 9.4 дат је приказ остварених трошкова одржавања за три Е-буса Higer KLQ6125GEV3 г.б 2101, 2102, 2103 након истека гарантног периода, који су током периода од 01.07.2018 до 05.03.2020. године имали стабилан рад и остварили највећи број пређених километара [175]. Аутобуси на електрични погон г.б 2104 и 2105 су због чекања резервних делова из Кине, остварили значајно мањи број пређених километара и не одражавају реално стање трошкова одржавања изражено у €·km<sup>-1</sup>.

Табела 9.4 Приказ трошкова одржавања за Е-бус Higer KLQ6125GEV3 г.б: 2101, 2102, 2103 за период 01.07.2018 до 05.03.2020. године

| Е-бус<br>г.б. | Број пређених<br>километара<br>km | Укупни<br>трошкови<br>RSD | Укупни<br>трошкови<br>€ | Специфични<br>трошкови<br>€·km <sup>-1</sup> |
|---------------|-----------------------------------|---------------------------|-------------------------|--|
| 2101          | 93.477                            | 280.617,90                | 2.388,24                | 0,026  |
| 2102          | 92.270                            | 236.191,80                | 2.010,14                | 0,022  |
| 2103          | 105.192                           | 208.979,72                | 1.778,55                | 0,017  |
| <b>Укупно</b> | <b>290.939</b>                    | <b>725.789,42</b>         | <b>6.176,93</b>         | <b>0,021</b>                                 |

Из табеле 9.4 произилази да је просечан трошак одржавања Е-буса сведен по километру пређеног пута 0,021 €·km<sup>-1</sup>. Возило г.б 2103 које је остварило највећу километражу у посматраном периоду имало је најмање трошкове одржавања од свега 0,017 €·km<sup>-1</sup>.

Трошкови одржавања аутобуса на дизел погон ИК-112М који су приближно исте старости, јер се у возном парку налазе од 2016. године, након истека двогодишњег гарантног периода су приказани у табели 9.5 [175].

Табела 9.5 Приказ трошкова одржавања за дизел аутобус ИК-112М, г.б: 3232, 3233, 3234 за период 01.10.2018 до 05.03.2020. године

| ИК-112М<br>г.б. | Број пређених<br>километара<br>km | Укупни<br>трошкови<br>RSD | Укупни<br>трошкови<br>€ | Специфични<br>трошкови<br>€·km <sup>-1</sup> |
|-----------------|-----------------------------------|---------------------------|-------------------------|--|
| 3232            | 125.446                           | 912.080,40                | 7.762,39                | 0,062  |
| 3233            | 159.975                           | 929.051,70                | 7.906,82                | 0,049  |
| 3234            | 120.769                           | 742.781,60                | 6.321,55                | 0,052  |
| <b>Укупно</b>   | <b>406.190</b>                    | <b>2.583.913,70</b>       | <b>21.990,75</b>        | <b>0,054</b>                                 |

Из табеле 9.5 произилази да је просечан трошак одржавања соло дизел аутобуса сведен по километру пређеног пута 0,054 €·km<sup>-1</sup>. Интересантно је упоредити и цену одржавања зглобног аутобуса Соларис (Solaris Urbino 18) након истека двогодишњег гарантног периода. На примеру аутобуса г.б. 3003, трошкови одржавања у периоду од 13.08.2015. године до 07.08.2016. године, износили су 0,069 €·km<sup>-1</sup> [175], што је за око 29% више у поређењу са соло дизел аутобусима.

Када су у питању трошкови одржавања аутобуса са погоном на КПП, на основу података из компаније за јавни градски превоз из Новог Сада, ЈГСП "Нови Сад", на основу показатеља рада 6 соло аутобуса са погоном на КПП Соларис (Solaris Urbino 12 CNG) и 15 соло аутобуса Ивеко (Iveco Crossway LE CNG) за период 2011-2014. година, трошкови одржавања износе око 0,063 €·km<sup>-1</sup> [166].

Треба напоменути да су приказани трошкови одржавања обухватили возила чија је старост била између 2 и 4 године, где су доминантно заступљени трошкови превентивног одржавања (редовни сервиси) и трошкови замене пнеуматика, док су трошкови корективног одржавања присутни у веома малој мери. Са порастом старости возила уочљиво је повећање заступљености трошкова корективног одржавања, што може да си види из табеле 9.6 где су дати трошкови одржавања за дизел аутобус ИК-112Н г.б 215 и 216, после 7. године експлоатације. Аутобуси ИК-112Н се у возном парку ЈКП ГСП "Београд" налази од 2008. године [175].

Табела 9.6 Приказ трошкова одржавања за дизел аутобус ИК-112N, г.б: 215 и 216

| ИК-112N<br>г.б | Период<br>дан/месец/година | Трошкови<br>одржавања<br>€ | Број пређених<br>километара<br>km | Специфични<br>трошкови<br>€·km <sup>-1</sup> |
|----------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------------|--|
| 215            | 12.07.2015÷11.07.2016      | 12.551                     | 62.994                            | 0,199  |
| 216            | 10.06.2016÷3.06.2017       | 9.814                      | 81.050                            | 0,121  |
| 216            | 15.08.2017÷10.08.2018      | 8.608                      | 78.220                            | 0,110  |
|                |                            | <b>30.973</b>              | <b>222.264</b>                    | <b>0,139</b>                                 |

Очигледан је значајан пораст трошкова одржавања код аутобуса после 7. године експлоатације. Посматрано на годишњем нивоу трошкови су удвостручени. Такође пређени број километара је мањи у поређењу са периодом експлоатације до 4. године. Већи број корективних радова на возилу због недостатака резервних делова или потребног времена за доставу често повлачи додатно изгубљено време које је утрошено, па је самим тим и мањи остварени број пређених километара на годишњем нивоу. Ако се анализирају трошкови одржавања возила у животном веку возила у прве 4 године минимални су трошкови одржавања, док у периоду после 8. године они се готово удвостручују. У периоду између 4. и 8. године трошкови су увећани за око 50% у односу на период до 4. године, што се може усвојити као просечна вредност трошкова одржавања у животном веку возила исказана у €·km<sup>-1</sup>.

Код аутобуса на електрични погон с обзиром да се налазе тек 4 године у експлоатацији, претпоставка је да ће са порастом старости возила и интензитет отказа појединих делова и компоненти бити већи, тако да је реално очекивање повећања трошкова одржавања од најмање 50%. Код аутобуса са електричним погоном који користи батерије као систем складиштења електричне енергије потребно је планирати најмање једну замену сета батерије. То је додатни трошак који треба предвидети у животном веку Е-буса. Цена замене батерије зависи од њеног капацитета и типа батерије и реално цена замене у овом моменту може бити између 10% и 30% од вредности новог возила. Реални век батерија за аутобусе на електрични погон је између 7 и 8 година. За очекивати је да ће у будућности цена батерије имати тренд смањења тако да ће и сам трошак бити реално процентуално мањи него сад. Суперкондензатори имају животни век који се поклапа са животним веком самог Е-буса. Гарантни период на суперкондензатор је 10 година. Након тога потребно је урадити сервис, који кошта око 2.500 € [176]. Одржавање пуњача за пуњење електричне енергије код аутобуса на електрични погон изискује минималне трошкове у поређењу са трошковима одржавања самог возила. Пуњачи за брзо пуњење који се користе у Београду на линији ЕКО 1 имају гарантни период од 5 година а процењено редовно одржавање је око 350 € годишње.

Код аутобуса са погоном на КПП, трошкови одржавања станице за пуњење возила са КПП су око 3.000 € на годишњем нивоу [174]. Треба предвидети и трошкове електричне енергије за рад електромотора приликом компримовања КПП, који су директно сразмерни количини природног гаса која је потребна за рад аутобуса према планираном обиму транспортног рада (просечна потрошња КПП по возилу, број возила, дневна километража). У специфичне трошкове одржавања возила на КПП треба планирати и трошкове периодичних прегледа боца за КПП и

инсталације на возилу, које се ради сваке 4 године од овлашћене институције (лабораторије).

### **Б) Трошкови погонске енергије**

Према извештају Агенције за енергетику Републике Србије, просечна цена електричне енергије са ПДВ и таксама исказана у €· kWh<sup>-1</sup>, за велике потрошаче у 2018. години износила је 0,084 €· kWh<sup>-1</sup> [153]. Ако се усвоји да је просечна годишња потрошња електричне енергије Е-буса 1,493 kWh·km<sup>-1</sup>, на линији ЕКО 1 и да је остварена годишња километража 62.750 km, следи да је трошак електричне енергије за један Е-бус 7.870 €.

Ако се пореде трошкови погонске енергије Е-буса са аутобусима са погоном на дизел гориво и КППГ на основу приказаних потрошњи у табели 8.10 следи да је на линији ЕКО 1 просечна потрошња дизел горива 0,4705 L·km<sup>-1</sup> и 0,4984 kg·km<sup>-1</sup> КППГ за МАЗ 203 КППГ. Цене дизел горива и КППГ у 2018. години износиле су 141 RSD·L<sup>-1</sup> (1,19 €·L<sup>-1</sup>) за дизел гориво и 69 RSD·kg<sup>-1</sup> (0,59 €·kg<sup>-1</sup>) за компримовани природни гас [51]. У табели 9.7 дат је приказ годишњих трошкова погонске енергије за стандардни градски аутобус различитих система погона на линији ЕКО 1.

Табела 9.7 Приказ годишњих трошкова погонске енергије на линији ЕКО 1 за стандардни аутобус различитих погонских система

| Тип стандардног аутобуса, врста погона      | Очекивани број пређених километара km | Трошак погонске енергије € |
|---|---------------------------------------|----------------------------|
| Higer KLQ6125GEV3, Е-бус                    | 62.750                                | 7.870                      |
| IK-112N, аутобус са погоном на дизел гориво | 62.750                                | 35.133                     |
| MAZ-203 CNG, аутобус са погоном на КППГ     | 62.750                                | 18.452                     |

На основу урађене анализе следи да Е-бус има ниже трошкове погонске енергије за 4,46 пута у односу на дизел аутобус и приближно 2,34 пута у односу на аутобусе са погоном на КППГ. Код аутобуса са погоном на дизел гориво који користе радни флуид уреа ед-блу (urea Ad-Blue) за смањење емисије азотних оксида треба узети у обзир и те трошкове. Просечна потрошња је око 3 L·(100km)<sup>-1</sup> а цена је 0,22 €·L<sup>-1</sup>.

### **Ц) Трошкови екологије**

Трошкови екологије представљају исказану новчану вредност настале емисије издувних гасова која потиче од рада возила као негативни утицај на окружење и здравље људи, односно потребна новчана средства која је потребно уложити на отклањање последица насталог аерозагађења. Трошкови емисије од издувних гасова за сваки од полутаната, дефинисани су Директивом (Directive 2009/33/ЕС) [18], како је приказано у табели 9.8.

Табела 9.8 Јединични трошкови аеро загађења од полутаната пореклом од возила

| Загађујућа материја   | Трошак аерозагађења              |
|---|----------------------------------|
| Угљен- моноксид (CO), угљен-диоксид (CO <sub>2</sub> )                          | од 3 до 4 €cent·kg <sup>-1</sup> |
| Угљоводоници (C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> ), остаци метана (CH <sub>4</sub> ) | 0,10 €cent·g <sup>-1</sup>       |
| Азотни-оксиди (NO <sub>x</sub> )  | 0,44 €cent·g <sup>-1</sup>       |
| Микрочестице (PM)   | 8,70 €cent·g <sup>-1</sup>       |

На примеру претпостављене годишње емисије гасова (WTW) на линији ЕКО 1 од Е-буса, Higer KLQ6125GEV3, аутобуса ИК-112N (ЕУРО 4) са погоном на дизел гориво и аутобуса MAZ-203 CNG на КПП, које су приказане у табели 8.10, укупни трошкови емисије за сваки тип аутобуса приказани су у табели 9.9.

Табела 9.9 Укупни трошкови емисије насталих гасова WTW анализа, за аутобусе различитих погонских система на линији ЕКО 1 у Београду, (годишњи период рада)

| Линија ЕКО 1                           | Јединица | Higer KLQ6125 GEV3 (Е-бус) 5 возила | ИК-112N дизел (ЕУРО 4) 5 возила | Дизел бус (ЕУРО 6) 5 возила | MAZ-203 CNG КПП (ЕУРО 6) 5 возила |
|--|----------|-------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| Трошкови емисије CO                    | €        | -                                   | 76,4                            | 76,4                        | 82,1                              |
| Трошкови емисије CxHy                  | €        | -                                   | 300,2                           | 87,2                        | 93,9                              |
| Трошкови емисије CH <sub>4</sub>       | €        | -                                   | -                               | -                           | 293,4                             |
| Трошкови емисије NO <sub>x</sub>       | €        | -                                   | 8.406,6                         | 1.103,5                     | 697,4                             |
| Трошкови емисије PM <sub>10</sub>      | €        | -                                   | 1.426,8                         | 474,3                       | 504,6                             |
| Трошкови емисије CO <sub>2</sub> - WTW | €        | 13.632,5                            | 15.515,5                        | 15.517,9                    | 16.306,5                          |
| <b>Укупни трошкови емисије</b>         | <b>€</b> | <b>13.632,5</b>                     | <b>25.725,6</b>                 | <b>17.259,3</b>             | <b>17.977,9</b>                   |

У табели 9.9 урађен је прорачун трошкова емисије и за стандардни аутобус са погоном на дизел гориво који испуњава норме ЕУРО 6, под претпоставком да има идентичну потрошњу дизел горива као аутобус ИК-112N (ЕУРО 4). Из табеле 9.9 проистиче да на трошкове укупне емисије која настаје у раду аутобуса највећи удео имају трошкови емисије угљен-диоксида (CO<sub>2</sub>). У наведеном примеру укупни трошкови емисије коју индиректно генеришу аутобуси на електрични погон мањи су од укупне емисије аутобуса са погоном на дизел гориво са нормама ЕУРО 4 за 47,0% , у односу на аутобусе са дизел погоном који имају норму ЕУРО 6 за око 21,0% и у односу на аутобус са погоном на КПП (ЕУРО 6) за око 24,1%.

#### Д) Остали оперативни трошкови

Остале оперативне трошкове обухватају трошкови: регистрације, обавезног осигурања возила од ауто одговорности и "каска" осигурања, с обзиром да аутобуси који раде у систему јавног градског транспорта имају висок ризик од оштећења изазваног сударом са другим возилима. Ако се куповина возила и опреме врши преко кредита банке, потребно је обухватити и месечне трошкове приспелих ануитета (камата) за период трајања отплате кредита.

#### Е) Укупни трошкови

Укупни трошкови експлоатације аутобуса у животном веку представљају збир појединачних трошкова који су наведени и могу се представити једначином:

$$T_{uk} = T_{inv} + T_{iop} + T_{ios} + T_{ood} + T_{oen} + T_{oek} + T_{oot} , \quad (9.2)$$

где је:

$T_{uk}$  – укупни трошкови у животном веку возила или групе возила, €,

$T_{inv}$  – инвестициони трошкови набавке возила, €,

$T_{iop}$  – инвестициони трошкови набавке опреме:

пуњачи, станице за КПП, специфични алати и опрема, €,

$T_{ios}$  – остали инвестициони трошкови (транспорт, обуке, дијагностика), €,

$T_{ood}$  – оперативни трошкови одржавања возила, без трошкова радне снаге, €,

$T_{oen}$  – оперативни трошкови погонске енергије, €,

$T_{oek}$  – оперативни трошкови еколошког загађења од коришћења возила, €,

$T_{oot}$  – оперативни трошкови, остали трошкови:

регистрација, обавезно осигурање, "каска" осигурање, ануитети, €.

Животни век возила у овом случају аутобуса која се користе у јавном градском превозу може бити различит и зависи од низа утицајних фактора од којих су најважнији: квалитет самог возила, услови експлоатације, квалитет одржавања и начин војње од стране возача. Према Директиви (Directive 2009/33/EC) [18], животни век аутобуса који се користе за јавни градски превоз је 800.000 km [18]. Реално аутобуси остварују знатно веће километраже у животном веку тако да се наведена километража може сматрати минималном која се реализује за пројектовани животни век возила који је између 10 и 12 година. За потребе израде финансијских извештаја предузећа која обављају јавни градски транспорт потребно је обрачунати и трошак амортизације на основна средства рада: возила, инфраструктура, опрема и алати, како је регулисано Законом о рачуноводству РС, ("Сл. гласник РС", бр.73/2019).

### 9.3 Студија случаја увођења аутобуса на електрични, дизел или погон на КПП

Упоредна анализа економских ефеката увођења различитих концепата погона аутобуса који могу бити коришћени у јавном градском превозу приказани су у студији случаја. Као могуће алтернативе су набавка 50: аутобуса на електрични погон са брзим пуњењем који имају суперкондензаторе капацитета 32 kWh, аутобуса на електрични погон са спорим пуњењем који користе LFP батерије капацитета 324 kWh, дизел аутобуса са ЕУРО 6 моторима или аутобуса на КПП (ЕУРО 6). С обзиром да аутобуси на електрични погон имају најбоље еколошке перформансе и најбољу подобност примене пре дефинитивне одлуке потребно је урадити економску анализу поређења укупних трошкова у животном веку са аутобусима на дизел гориво и КПП према **критеријуму минималне нето садашње вредности** ( $\min T_{nsv}$ ).

$$T_{nsv} = \sum_{t=0}^{n_{zv}} \frac{T_{uk}}{(1 + d_{sk})^t}, \quad (9.3)$$

где је:

$T_{nsv}$  – нето садашња вредност укупних трошкова у животном веку возила, €,

$T_{uk}$  – укупни трошкови у животном веку возила или групе возила, €,

$d_{sk}$  – дисконтна стопа, %,

$n_{zv}$  – животни век возила (година).

Улазни елементи за економску анализу су следећи:

- животни век возила 16 година,
- планирани број пређених километара по возилу 85.000 km,



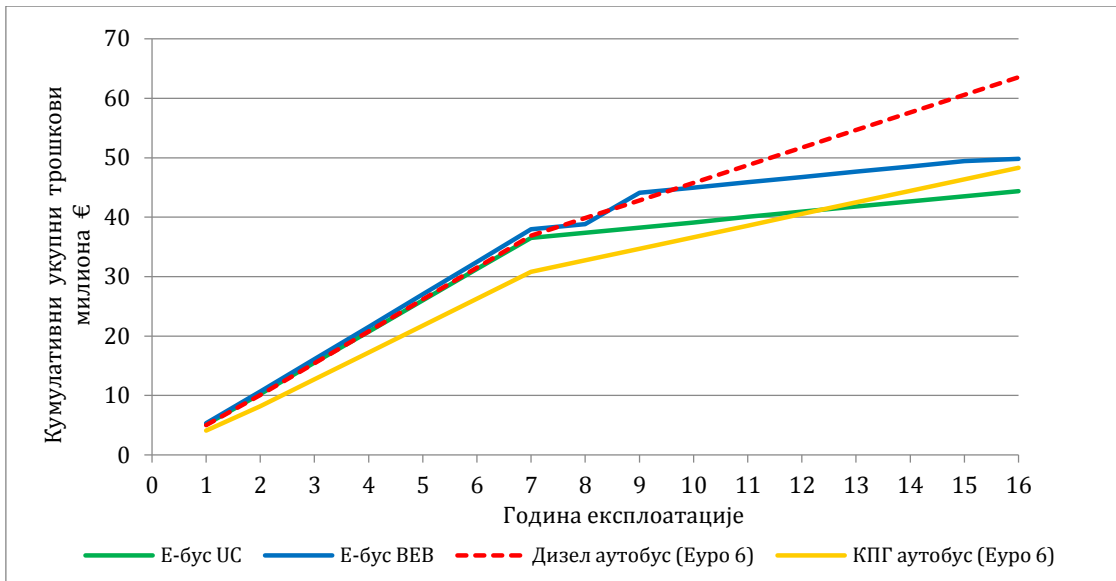
- потрошњу енергије за Е-бус, дизел аутобусе и аутобусе на КПП- усвојити вредности које су остварене на линији ЕКО 1,
- приликом анализе тржишта аутобуса предност дати произвођачима чија се возила користе у земљама Западне Европе, где је цена аутобуса на дизел погон (ЕУРО 6) 240.000 €, на КПП (ЕУРО 6) 265.000 €, Е-бус са суперкондензатором 487.000 € и Е-бус са батеријама 522.000 €,
- трошкове инвестиција и оперативне трошкове рачунати на основу података који су приказани у тачки 9.1,
- гарантни период за возила и опрему је 2 године и током гаранције покривени су сви трошкови превентивног и корективног одржавања,
- као подстицајна мера за куповину аутобуса на електрични погон или аутобуса на КПП погон, држава је ослободила превознике плаћање пореза (ПДВ) за возила и инфраструктуру,
- трошкови транспорта нових возила приликом испоруке до корисника, трошкови тренинга, трошкови дијагностичке опреме, трошкови регистрације возила, трошкови обавезног осигурања, трошкови плата возача и радника одржавања и преостала (резидуална) вредност возила усвојити да су идентични за све типове аутобуса, и није их потребно посебно приказивати, као ни трошкове амортизације возила, инфраструктуре, опреме и алата.
- преостала (резидуална) вредност батерије је 10% од цене нове батерије,
- пројекат се финансира из кредита банака са максималним периодом отплате од 7 године и актуелном каматном стопом на тржишту капитала од 3,0% годишње и дисконтном стопом од 3,0%,
- током периода отплате кредита за сва возила је потребно "каска" осигурање, са годишњом фиксном премијом осигурања 0,7% од вредности новог возила.

Укупни трошкови по годинама експлоатације возила приказани су у табели 9.10.

Табела 9.10 Укупни трошкови по годинама експлоатације

|                  | Е-бус УС<br>€        | Е-бус ВЕВ<br>€       | Дизел аутобус (ЕУРО 6)<br>€ | КПП аутобус (ЕУРО 6)<br>€ |
|------------------|----------------------|----------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Вредност кредита | 26.390.000,00        | 27.350.000,00        | 14.400.000,00               | 15.457.623,00             |
| 1. година        | 5.123.998,46         | 5.326.223,85         | 5.036.686,61                | 4.108.844,55              |
| 2. година        | 5.123.998,46         | 5.326.223,85         | 5.036.686,61                | 4.108.844,55              |
| 3. година        | 5.257.873,46         | 5.460.098,85         | 5.361.811,61                | 4.513.469,55              |
| 4. година        | 5.257.873,46         | 5.460.098,85         | 5.361.811,61                | 4.513.469,55              |
| 5. година        | 5.257.873,46         | 5.460.098,85         | 5.361.811,61                | 4.538.469,55              |
| 6. година        | 5.261.373,46         | 5.460.098,85         | 5.361.811,61                | 4.513.469,55              |
| 7. година        | 5.261.373,46         | 5.460.098,85         | 5.361.811,61                | 4.513.469,55              |
| 8. година        | 855.160,78           | 887.550,07           | 2.966.520,12                | 1.939.672,85              |
| 9. година        | 855.160,78           | 5.261.550,07         | 2.966.520,12                | 1.939.672,85              |
| 10. година       | 855.160,78           | 887.550,07           | 2.966.520,12                | 1.964.672,85              |
| 11. година       | 980.160,78           | 887.550,07           | 2.966.520,12                | 1.939.672,85              |
| 12. година       | 855.160,78           | 887.550,07           | 2.966.520,12                | 1.939.672,85              |
| 13. година       | 855.160,78           | 887.550,07           | 2.966.520,12                | 1.939.672,85              |
| 14. година       | 855.160,78           | 887.550,07           | 2.966.520,12                | 1.939.672,85              |
| 15. година       | 855.160,78           | 887.550,07           | 2.966.520,12                | 1.964.672,85              |
| 16. година       | 855.160,78           | 369.150,07           | 2.966.520,12                | 1.939.672,85              |
|                  | <b>44.365.811,28</b> | <b>49.796.492,60</b> | <b>63.581.112,37</b>        | <b>48.317.092,47</b>      |

На слици 9.1 приказана је кумуланта трошкова у целокупном животном веку возила.



Слика 9.1 Кумулативни укупни трошкови за аутобусе у животном веку

На основу израчунатих укупних годишњих трошкова за све врсте аутобуса који су предмет анализе и кумулативног приказа следи да су најмањи укупни трошкови у животном веку од 16 година остварени код аутобуса на електрични погон који користе суперкондензатор у износу од 44.365.811,28 €, затим следе аутобуси са погоном на КПГ у износу од 48.317.092,47 €, аутобуси на електрични погон са батеријама чији су трошкови 49.796.492,60 € док највеће трошкове имају аутобуси на дизел погон у износу од 63.581.112,37 €.

Аутобуси на електрични погон имају значајно веће инвестиционе трошкове што се може видети из вредности кредита у поређењу са аутобусима који користе дизел гориво и аутобусима на КПГ. Временски период када се укупни кумулативни трошкови изједначавају код аутобуса на електрични погон који користе суперкондензаторе и дизел аутобуса је после 7. године експлоатације. У поређењу са аутобусима на КПГ тај период је после 12,5 година. Економски Е-бусеви који користе LFP батерије, због трошкова замене сета батерије после 8. године експлоатације, мање су исплативи у поређењу са аутобусима са суперкондензатором. Укупни трошкови на крају животног века аутобуса са батеријама су већи у поређењу са аутобусима на КПГ а у поређењу са аутобусима на дизел гориво трошкови се изједначавају нешто пре 10. године експлоатације. Према задатом критеријуму најмање нето садашње вредности укупних трошкова током животног века аутобуса добијени су резултати који су приказани у табели 9.11.

Табела 9.11 Нето садашња вредност укупних трошкова аутобуса различитих погонских

| Врста аутобуса         | $T_{nsv}$ , € |
|------------------------|---------------|
| Е-бус UC               | 38.011.821,52 |
| КПГ аутобус (ЕУРО 6)   | 39.681.886,70 |
| Е-бус БЕВ              | 42.409.971,01 |
| Дизел аутобус (ЕУРО 6) | 51.563.988,81 |

На основу резултата из табеле 9.11, набавка 50 соло аутобуса на електрични погон који користе суперкондензатор капацитета 32 kWh са припадајућим пуњачима има највећу економску оправданост ( $\min T_{nsv} = 38.011.821,52$ ).

## 10. МОДЕЛИРАЊЕ ВОЗНОГ ЦИКЛУСА И СИМУЛАЦИЈА РАДА АУТОБУСА НА ЕЛЕКТРИЧНИ ПОГОН

Познавање реалне потрошње електричне енергије и енергије рекуперације код аутобуса на електрични погон су веома битни за становишта правилног избора возила и задовољења експлоатационих захтева који се постављају у реалном систему јавног градског транспорта. Потрошња електричне енергије Е-буса важна је и са аспекта пројектовања инфраструктуре и избора пуњача одговарајуће снаге који су неопходни за несметано функционисање рада овог типа аутобуса. Пре увођења аутобуса на електрични погон на неку од линија које су у систему јавног градског транспорта пожељно је извршити пробно тестирање одређеног типа возила како би се сагледале његове техничке карактеристике и ефекти рада.

Расположивост возила, мерне опреме, организација тестирања и обрада података могу бити ограничавајући фактори, тако да се у инжењерској пракси користе одговарајући симулациони модели који треба да верно представе услове експлоатације на некој изабраној линији и техничке карактеристике аутобуса. Подаци добијени симулацијом су блиски подацима који би се добили мерењима ако је симулациони модел добар. У дисертацији је приказано моделирање основног (простог) возног циклуса на основу улазних елемената полигонског испитивања и сложеног возног циклуса на градским линијама ЕКО 1 (Вуков споменик-Насеље Белвил) и линији бр. 29 (Дорћол-Медаковић III) на основу статичких, динамичких елемената и реалних токова путника. Симулација рада аутобуса на електрични погон (SimE-bus) Higer KLQ6125GEV3, према задатим возним циклусима урађена је на основу прорачуна отпора кретања, потребне снаге и енергије за кретање Е-буса и карактеристика регенеративног кочења према једначинама које су детаљно приказане у Поглављу 5 и Поглављу 7 дисертације.

Поређење резултата симулације и измерних резултата потрошње електричне енергије и енергије рекуперације који су приказани у Поглављу 6 и 7 омогућавају верификацију модела рада аутобуса на електрични погон. SimE-bus је урађен коришћењем програма MS Office-Excel 2007.

### 10.1 Моделирање основног возног циклуса рада Е-буса

Основни (прост) возни циклус састоји се од фазе убрзавања, вожње константном брзином и кочења до заустављања. Елементи основног возног циклуса на основу полигонског мерења [53], где је достигнута максимална брзина кретања од  $44 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , приказани су у табели 10.1.

Табела 10.1 Основни возни циклус

|  | Трајање<br>s | Пређени пут<br>m |
|--|--------------|------------------|
| Убрзање  | 16,79        | 126,26           |
| Константна брзина, $v_{const}=44 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ | 3,68         | 44,94            |
| Кочење   | 15,81        | 100,69           |
| <b>укупно</b>  | <b>36,28</b> | <b>271,89</b>    |

Начин убрзавања возила од стране возача дефинисан је различитим кривама које представљају промене брзине у току времена потребног за постизање крајње, максималне брзине и које су одређене изразом [53]:

$$v = v_o + (v_f - v_o) \left( \frac{t - t_o}{t_f - t_o} \right)^\beta, \quad (10.1)$$

где је:

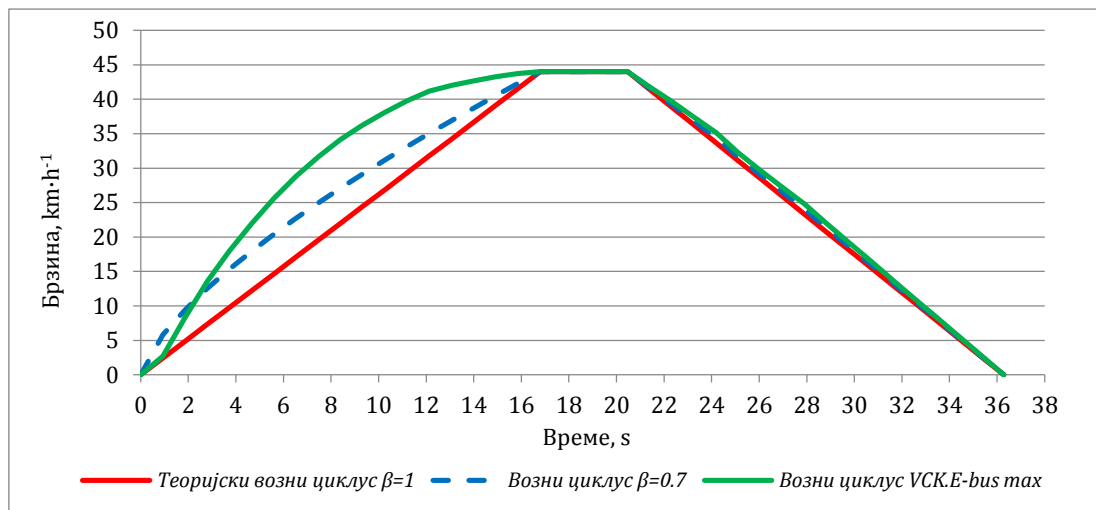
$v, v_o, v_f$  – тренутна, почетна и крајња брзина,  $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,

$t, t_o, t_f$  – тренутно, почетно и крајње време убрзања,  $\text{s}$ ,

$\beta$  – коефицијент убрзања.

За вредност коефицијента  $\beta=1$ , добијена је линеарна крива достизања максималне брзине, где убрзање возила има константну вредност. У реалним условима рада Е-буса максимална брзина кретања возила је ограничена на  $50 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , тако да се у градским условима рада на саобраћајницама прост возни циклус реализује са максималним брзина које су најчешће између  $35 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  и  $45 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . Теоријски возни циклус за вредност  $\beta=1$  (TVCK  $\beta=1$ ) је тешко остварив у реалним условима, тако да крива пораста брзине има конкавни облик у односу на линеарну криву при чему је реална вредност коефицијента  $\beta \approx 0,7$ . У неким екстремним случајевима вредност коефицијента  $\beta$  може имати и мање вредности које се крећу  $\beta \approx 0,4 \div 0,6$  и у великој мери зависе од вучних перформанси погонског система контролер-електромотор. У фази кочења код аутобуса за градски транспорт препоручено успорење са аспекта комфора и безбедности путника је  $0,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ .

За потребе симулације моделиран је возни циклус VCK.E-bus<sub>max</sub>, где тренутна брзина убрзаног кретања Е-буса иде по конкавној криви на основу максималних тренутних убрзања која представљају граничне (екстремне) вредности. Достизање задате максималне брзине Е-буса од  $44 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  за три карактеристична случаја где су вредности коефицијента  $\beta=1, \beta = 0,7$  и за VCK.E-bus<sub>max</sub> приказани су на слици 10.1.



Слика 10.1 Основни возни циклус за симулацију рада Е-бус Higer KLQ6125GEV3

Тренутна убрзања возила за сваки возни циклус која се остварују у пракси имају различите вредности односно случајни карактер и крећу се у границама дефинисаним возним циклусима VCK.E-bus<sub>max</sub> и TVCK  $\beta=1$  тако да је могуће помоћу програма MS Office Excel 2007 и функције генератора случајних бројева =RAND() симулирати нови (случајни) возни циклус, VCKS.E-bus где је испуњено:

$$\text{VCK.E-bus}_{\text{max}} < \text{VCKS.E-bus} < \text{TVCK } \beta=1 \quad (10.2)$$

Симулације тренутних убрзања Е-буса могу се добити на следећи начин:

$$a'_{ebus} = \text{RAND}() \cdot (a_{ebus_{max}} - a_{ebus_{min}}) + a_{ebus_{min}}, \quad (10.3)$$

где је:

$a'_{ebus}$  - тренутна симулирана вредност убрзања возног циклуса VCKS.E-bus,  $m \cdot s^{-2}$ ,  
 $a_{ebus_{max}}$  - макс. тренутна вредност убрзања према VCK.E-bus<sub>max</sub> или TVCK  $\beta=1$ ,  $m \cdot s^{-2}$ ,  
 $a_{ebus_{min}}$  - мин. тренутна вредност убрзања према TVCK  $\beta=1$  или VCK.E-bus<sub>max</sub>  $m \cdot s^{-2}$ ,  
 =RAND()- генератор случајних бројева на интервалу  $0 \div 1$ .

На сличан начин симулирана су тренутна успорења у фази кочења коришћењем генератора случајних бројева, где је минимална вредност успорења  $0,55 m \cdot s^{-2}$  а максимална  $0,90 m \cdot s^{-2}$ , која одговарају реалним успорењима са полигонског испитивања.

$$b'_{ebus} = \text{RAND}() \cdot (b_{ebus_{max}} - b_{ebus_{min}}) + b_{ebus_{min}}, \quad (10.4)$$

где је:

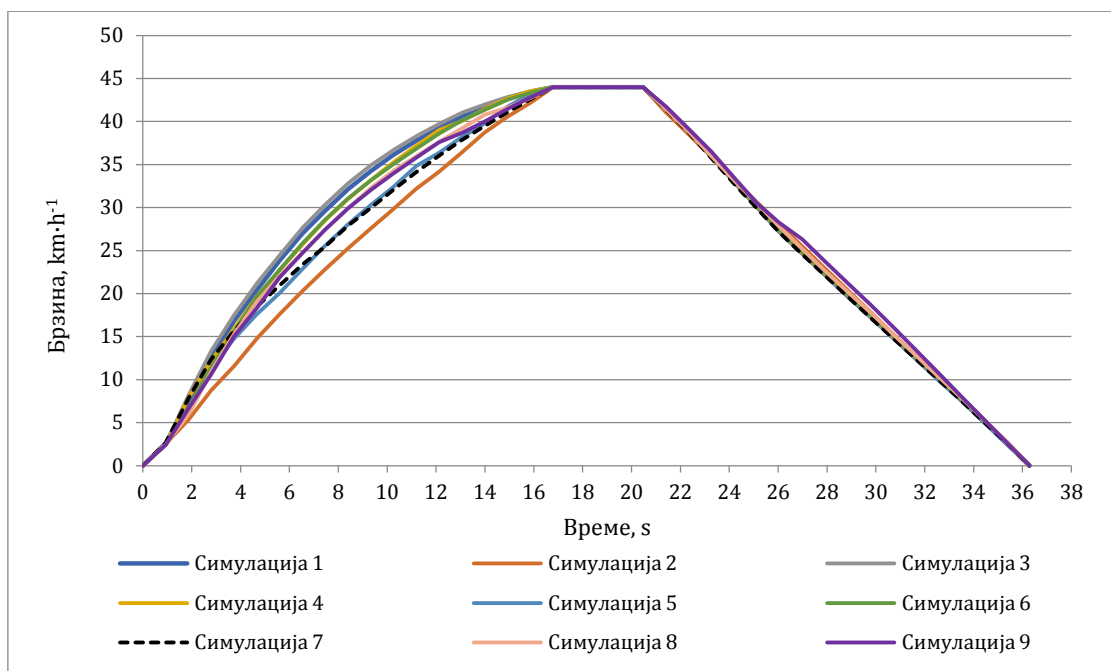
$b'_{ebus}$  - тренутна симулирана вредност успорења возног циклуса,  $m \cdot s^{-2}$ ,  
 $b_{ebus_{max}}$  - максимална тренутна вредност успорења  $0,9 m \cdot s^{-2}$ ,  
 $b_{ebus_{min}}$  - минимална тренутна вредност успорења  $0,55 m \cdot s^{-2}$ .

На основу урађеног великог броја симулација помоћу једначина 10.3 и 10.4 издвојено је 9 симулација возних циклуса при којима се за симулиране вредности убрзања достиже максимална брзина кретња Е-буса од  $44 km \cdot h^{-1}$ , време трајања константне вожње од  $3,68 s$ , и симулирана успорења при којима се Е-бус зауставља у  $36,28$  секунди трајања возног циклуса како је приказано у табели 10.2.

Табела 10.2 Симулације убрзања и успорења Е-буса Higer KLQ6125GEV3

| Време вожње s | Режим                     | Возни циклус $\beta=1$ $m \cdot s^{-2}$ | Возни циклус $\beta=0.7$ $m \cdot s^{-2}$ | Возни циклус E-bus <sub>max</sub> $m \cdot s^{-2}$ | Возни циклус Симул.1 $m \cdot s^{-2}$ | Возни циклус Симул.2 $m \cdot s^{-2}$ | Возни циклус Симул.3 $m \cdot s^{-2}$ | Возни циклус Симул.4 $m \cdot s^{-2}$ | Возни циклус Симул.5 $m \cdot s^{-2}$ | Возни циклус Симул.6 $m \cdot s^{-2}$ | Возни циклус Симул.7 $m \cdot s^{-2}$ | Возни циклус Симул.8 $m \cdot s^{-2}$ | Возни циклус Симул.9 $m \cdot s^{-2}$ |
|---------------|---------------------------|---|---|--|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 0,00          | стајање                   | 0,000                                   | 0,000                                     | 0,000  | 0,000                                 | 0,000                                 | 0,000                                 | 0,000                                 | 0,000                                 | 0,000                                 | 0,000                                 | 0,000                                 | 0,000                                 |
| 0,93          | убрзање                   | 0,728                                   | 1,733                                     | 0,801  | 0,788                                 | 0,757                                 | 0,765                                 | 0,735                                 | 0,729                                 | 0,730                                 | 0,798                                 | 0,738                                 | 0,731                                 |
| 1,87          | убрзање                   | 0,728                                   | 1,082                                     | 1,695  | 1,456                                 | 0,839                                 | 1,665                                 | 1,605                                 | 1,220                                 | 1,263                                 | 1,531                                 | 1,031                                 | 1,249                                 |
| 2,80          | убрзање                   | 0,728                                   | 0,924                                     | 1,545  | 1,499                                 | 1,011                                 | 1,542                                 | 1,287                                 | 1,440                                 | 1,400                                 | 1,356                                 | 1,483                                 | 1,180                                 |
| 3,73          | убрзање                   | 0,728                                   | 0,834                                     | 1,312  | 1,264                                 | 0,831                                 | 1,228                                 | 1,102                                 | 1,002                                 | 1,244                                 | 0,975                                 | 1,301                                 | 1,308                                 |
| 4,67          | убрзање                   | 0,728                                   | 0,773                                     | 1,195  | 1,055                                 | 0,953                                 | 1,102                                 | 1,125                                 | 0,848                                 | 1,191                                 | 0,842                                 | 1,115                                 | 0,980                                 |
| 5,60          | убрзање                   | 0,728                                   | 0,728                                     | 1,080  | 1,045                                 | 0,857                                 | 0,980                                 | 0,910                                 | 0,739                                 | 0,954                                 | 0,744                                 | 0,896                                 | 1,071                                 |
| 6,53          | убрзање                   | 0,728                                   | 0,692                                     | 0,951  | 0,929                                 | 0,793                                 | 0,946                                 | 0,886                                 | 0,833                                 | 0,912                                 | 0,716                                 | 0,803                                 | 0,846                                 |
| 7,46          | убрзање                   | 0,728                                   | 0,663                                     | 0,840  | 0,789                                 | 0,752                                 | 0,806                                 | 0,838                                 | 0,808                                 | 0,820                                 | 0,626                                 | 0,802                                 | 0,802                                 |
| 8,40          | убрзање                   | 0,728                                   | 0,638                                     | 0,748  | 0,745                                 | 0,729                                 | 0,729                                 | 0,730                                 | 0,731                                 | 0,730                                 | 0,720                                 | 0,728                                 | 0,730                                 |
| 9,33          | убрзање                   | 0,728                                   | 0,617                                     | 0,630  | 0,627                                 | 0,693                                 | 0,629                                 | 0,666                                 | 0,673                                 | 0,632                                 | 0,614                                 | 0,712                                 | 0,650                                 |
| 10,26         | убрзање                   | 0,728                                   | 0,599                                     | 0,545  | 0,565                                 | 0,670                                 | 0,539                                 | 0,628                                 | 0,626                                 | 0,566                                 | 0,633                                 | 0,596                                 | 0,573                                 |
| 11,20         | убрзање                   | 0,728                                   | 0,583                                     | 0,507  | 0,491                                 | 0,708                                 | 0,471                                 | 0,565                                 | 0,722                                 | 0,535                                 | 0,611                                 | 0,498                                 | 0,540                                 |
| 12,13         | убрзање                   | 0,728                                   | 0,569                                     | 0,410  | 0,429                                 | 0,577                                 | 0,427                                 | 0,535                                 | 0,459                                 | 0,519                                 | 0,565                                 | 0,503                                 | 0,537                                 |
| 13,06         | убрзање                   | 0,728                                   | 0,556                                     | 0,245  | 0,412                                 | 0,674                                 | 0,384                                 | 0,317                                 | 0,538                                 | 0,455                                 | 0,535                                 | 0,465                                 | 0,319                                 |
| 14,00         | убрзање                   | 0,728                                   | 0,544                                     | 0,200  | 0,339                                 | 0,689                                 | 0,286                                 | 0,415                                 | 0,476                                 | 0,366                                 | 0,495                                 | 0,474                                 | 0,393                                 |
| 14,93         | убрзање                   | 0,728                                   | 0,533                                     | 0,181  | 0,290                                 | 0,550                                 | 0,255                                 | 0,372                                 | 0,582                                 | 0,345                                 | 0,474                                 | 0,239                                 | 0,437                                 |
| 15,86         | убрзање                   | 0,728                                   | 0,523                                     | 0,130  | 0,215                                 | 0,478                                 | 0,197                                 | 0,240                                 | 0,444                                 | 0,255                                 | 0,443                                 | 0,339                                 | 0,395                                 |
| 16,79         | убрзање                   | 0,728                                   | 0,514                                     | 0,085  | 0,163                                 | 0,540                                 | 0,150                                 | 0,145                                 | 0,230                                 | 0,203                                 | 0,422                                 | 0,378                                 | 0,360                                 |
| 17,71         | $v_{ebus} = \text{const}$ | 0,000                                   | 0,000                                     | 0,000  | 0,000                                 | 0,000                                 | 0,000                                 | 0,000                                 | 0,000                                 | 0,000                                 | 0,000                                 | 0,000                                 | 0,000                                 |
| 18,63         | $v_{ebus} = \text{const}$ | 0,000                                   | 0,000                                     | 0,000  | 0,000                                 | 0,000                                 | 0,000                                 | 0,000                                 | 0,000                                 | 0,000                                 | 0,000                                 | 0,000                                 | 0,000                                 |
| 19,55         | $v_{ebus} = \text{const}$ | 0,000                                   | 0,000                                     | 0,000  | 0,000                                 | 0,000                                 | 0,000                                 | 0,000                                 | 0,000                                 | 0,000                                 | 0,000                                 | 0,000                                 | 0,000                                 |
| 20,47         | $v_{ebus} = \text{const}$ | 0,000                                   | 0,000                                     | 0,000  | 0,000                                 | 0,000                                 | 0,000                                 | 0,000                                 | 0,000                                 | 0,000                                 | 0,000                                 | 0,000                                 | 0,000                                 |
| 21,40         | кочење                    | 0,773                                   | 0,715                                     | 0,657  | 0,743                                 | 0,872                                 | 0,762                                 | 0,705                                 | 0,771                                 | 0,740                                 | 0,780                                 | 0,755                                 | 0,668                                 |
| 22,33         | кочење                    | 0,773                                   | 0,711                                     | 0,648  | 0,786                                 | 0,767                                 | 0,781                                 | 0,790                                 | 0,780                                 | 0,793                                 | 0,787                                 | 0,779                                 | 0,774                                 |
| 23,26         | кочење                    | 0,773                                   | 0,722                                     | 0,671  | 0,842                                 | 0,780                                 | 0,866                                 | 0,857                                 | 0,856                                 | 0,843                                 | 0,894                                 | 0,859                                 | 0,798                                 |
| 24,19         | кочење                    | 0,773                                   | 0,720                                     | 0,667  | 0,884                                 | 0,779                                 | 0,894                                 | 0,875                                 | 0,798                                 | 0,846                                 | 0,883                                 | 0,838                                 | 0,899                                 |
| 25,12         | кочење                    | 0,773                                   | 0,824                                     | 0,874  | 0,886                                 | 0,788                                 | 0,850                                 | 0,880                                 | 0,809                                 | 0,880                                 | 0,861                                 | 0,792                                 | 0,882                                 |
| 26,05         | кочење                    | 0,773                                   | 0,768                                     | 0,763  | 0,876                                 | 0,776                                 | 0,858                                 | 0,883                                 | 0,871                                 | 0,865                                 | 0,843                                 | 0,829                                 | 0,691                                 |
| 26,98         | кочење                    | 0,773                                   | 0,758                                     | 0,743  | 0,751                                 | 0,763                                 | 0,756                                 | 0,752                                 | 0,765                                 | 0,759                                 | 0,756                                 | 0,760                                 | 0,565                                 |
| 27,91         | кочење                    | 0,773                                   | 0,749                                     | 0,725  | 0,739                                 | 0,766                                 | 0,745                                 | 0,730                                 | 0,725                                 | 0,741                                 | 0,736                                 | 0,766                                 | 0,769                                 |
| 28,84         | кочење                    | 0,773                                   | 0,804                                     | 0,835  | 0,741                                 | 0,760                                 | 0,721                                 | 0,729                                 | 0,770                                 | 0,734                                 | 0,731                                 | 0,729                                 | 0,756                                 |
| 29,77         | кочење                    | 0,773                                   | 0,797                                     | 0,821  | 0,714                                 | 0,750                                 | 0,714                                 | 0,723                                 | 0,751                                 | 0,715                                 | 0,728                                 | 0,712                                 | 0,744                                 |
| 30,70         | кочење                    | 0,773                                   | 0,798                                     | 0,823  | 0,740                                 | 0,771                                 | 0,739                                 | 0,722                                 | 0,728                                 | 0,730                                 | 0,717                                 | 0,765                                 | 0,778                                 |
| 31,63         | кочење                    | 0,773                                   | 0,799                                     | 0,825  | 0,716                                 | 0,751                                 | 0,727                                 | 0,735                                 | 0,749                                 | 0,734                                 | 0,714                                 | 0,731                                 | 0,796                                 |
| 32,56         | кочење                    | 0,773                                   | 0,796                                     | 0,818  | 0,731                                 | 0,742                                 | 0,715                                 | 0,722                                 | 0,773                                 | 0,716                                 | 0,725                                 | 0,747                                 | 0,808                                 |
| 33,49         | кочење                    | 0,773                                   | 0,793                                     | 0,813  | 0,719                                 | 0,736                                 | 0,723                                 | 0,741                                 | 0,721                                 | 0,744                                 | 0,724                                 | 0,723                                 | 0,805                                 |
| 34,42         | кочење                    | 0,773                                   | 0,798                                     | 0,823  | 0,749                                 | 0,768                                 | 0,740                                 | 0,745                                 | 0,736                                 | 0,740                                 | 0,739                                 | 0,767                                 | 0,802                                 |
| 35,35         | кочење                    | 0,773                                   | 0,796                                     | 0,818  | 0,761                                 | 0,773                                 | 0,770                                 | 0,732                                 | 0,737                                 | 0,730                                 | 0,731                                 | 0,751                                 | 0,801                                 |
| 36,28         | кочење                    | 0,773                                   | 0,795                                     | 0,817  | 0,750                                 | 0,789                                 | 0,789                                 | 0,810                                 | 0,797                                 | 0,830                                 | 0,794                                 | 0,827                                 | 0,801                                 |

На основу симулираних вредности убрзања и успорења Е-буса, дијаграм брзине равномерно убрзаног кретања возила, вожње константном брзином и равномерно успореног кретања до заустављања за сваки симулирани возни циклус приказан је на слици 10.2.



Слика 10.2 Симулације брзине кретања Е-бус Нигер КЛQ6125GEV3 на основном возном циклусу

## 10.2 Улазни параметри симулације рада Е-буса Нигер КЛQ6125GEV3

Симулација рада аутобуса на електрични погон (SimE-bus), Нигер КЛQ6125GEV3, заснива се на познавању техничких карактеристика возила, специфичностима теорије кретања и кочења аутобуса на електрични погон, као и резултатима истраживања који су спроведени у дисертацији.

Симулација рада Е-буса Нигер КЛQ6125GEV3 за дефинисане основне возне циклусе на основу вредности убрзања и успорења, што је приказано у табелама 10.1 и 10.2 урађена је у програму MS Office Excel 2007, коришћењем једначина теорије кретања и регенеративног кочења, што је приказано у Поглављу 5 и Поглављу 7.

Симулација је урађена за Е-бус Нигер КЛQ6125GEV3 чија је маса возила спремног за вожњу 16.086 kg, што одговара оптерећењу са 52 путника, с обзиром да је на полигонском испитивању маса Е-буса износила 16.100 kg [53].

У симулацији прорачун потрошње и рекулерације електричне енергије Е-буса је урађен за случај потпуно равне испитне стазе без нагиба (успон/пад) пута и за случај постојања нагиба (пада) пута од -0,7% колики је био нагиб испитне стазе (правац "Б") током полигонског мерења [53].

У симулацији као и у непосредном мерењу систем за хлађење и грејање унутрашњег простора Е-буса је искључен ( $P_{ac}=P_h=0$ ). У табели 10.3 приказани су потребни елементи за симулацију рада Е-буса који се односе на техничке карактеристике возила и окружење (путници, коловоз, ваздух).

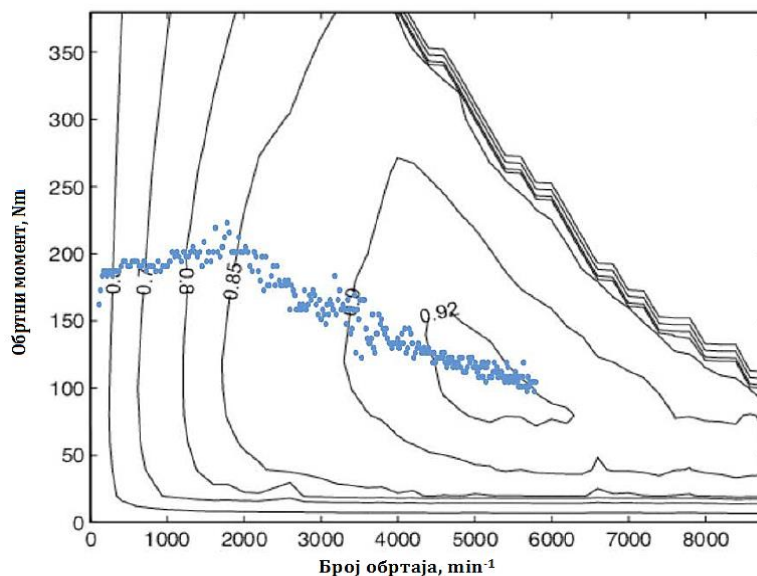
Табела 10.3 Е-буса Higer KLQ6125GEV3, техничке карактеристике

|   | Ознака           | Јединица           | Вредност       |
|---|------------------|--------------------|----------------|
| Број путника у возилу   | $Z$              |                    | 52             |
| Нагиб (успон/пад) пута  | $u$              | %                  | -0,7           |
| Спољна температура  | $T_{out}$        | °C                 | 18             |
| Маса празног возила   | $m_{pebus}$      | kg                 | 12.550         |
| Просечна маса путника   | $m_{put}$        | kg                 | 68             |
| Маса возила спремног за вожњу (тест)  | $m_{ebus}$       | kg                 | 16.086         |
| Ширина возила   | $S_{ebus}$       | m                  | 2,55           |
| Висина возила   | $H_{ebus}$       | m                  | 3,63           |
| Чеона површина возила   | $A_{ebus}$       | m <sup>2</sup>     | 6,80           |
| Међуосовинско растојање   | $l$              | m                  | 5,9            |
| Растојање од тежишта Е-буса до предње осовине                                     | $l_v$            | m                  | 4,1            |
| Растојање од тежишта Е-буса до задње осовине                                      | $l_h$            | m                  | 1,8            |
| Висина тежишта Е-буса   | $h$              | m                  | 0,95           |
| Максимални број путника   | $Z_{pmax}$       |                    | 80             |
| Расподела масе Е-буса по осовинама, предња/погонска (празно возило)               | $m_{pr}/m_{pog}$ | kg                 | 3.770/8.780    |
| Расподела масе Е-буса по осовинама, предња/погонска (оптерећено возило 18.000 kg) | $m_{pr}/m_{pog}$ | kg                 | 6.610/11.390   |
| Тип погонског електромотора, број уграђених агрегата                              | 1PV5135W24       |                    | 2              |
| Вршна снага погонског електромотора ( 1 минут)                                    | $P_{em,max(1)}$  | kW                 | 150            |
| Вршна снага погонског електромотора ( 5 минут)                                    | $P_{em,max(5)}$  | kW                 | 90             |
| Номинална снага погонског електромотора   | $P_{em,nom}$     | kW                 | 61             |
| Максимални обртни момент погонског електромотора                                  | $M_{em,max}$     | Nm                 | 430            |
| Номинални обртни момент погонског електромотора                                   | $M_{em,nom}$     | Nm                 | 160            |
| Максимални број обртаја погонског електромотора                                   | $n_{o,max}$      | min <sup>-1</sup>  | 10.000         |
| Макс. коефицијент ефикасности погонског електромотора                             | $\eta_{em}$      |                    | 0,95           |
| Максимални коефицијент ефикасности инвертора                                      | $\eta_i$         |                    | 0,97           |
| Преносни однос збирног преносника снаге (редуктора)                               | $i_r$            |                    | 4,2            |
| Преносни однос главног преносника снаге   | $i_o$            |                    | 6,14           |
| Укупни преносни однос трансмисије   | $i_t$            |                    | 25,79          |
| Коефицијент искоришћења трансмисије   | $\eta_t$         |                    | 0,945          |
| Динамички полупречник точка   | $r_d$            | m                  | 0,46           |
| Коефицијент ротирајућих маса возила   | $\delta$         |                    | 1,04           |
| Гравитационо убрзање  | $g$              | m·s <sup>-2</sup>  | 9,81           |
| Густина ваздуха   | $\rho_v$         | kg·m <sup>-3</sup> | 1,2            |
| Аеродинамички коефицијент отпора ваздуха  | $C_v$            |                    | 1,15           |
| Коефицијент квалитета површине пута   | $k_{as}$         |                    | 1,2            |
| Максимална снага система за хлађење Е-буса  | $P_{ac}$         | kW                 | 22,0 /искључен |
| Максимална снага система за грејање Е-буса  | $P_h$            | kW                 | 30,0/ искључен |
| Максимална снага компресора за ваздух   | $P_{compr,max}$  | kW                 | 3,0            |
| Максимална снага пумпе управљача  | $P_{pu,max}$     | kW                 | 3,0            |
| Максимална снага нисконапонске инсталације  | $P_{nv,max}$     | kW                 | 1,5            |
| Максимална акумулирана електрична енергија суперкондензатора                      | AOWEI            | kWh                | 20             |
| Ефикасност акумулирања  | $\eta_{uc}$      |                    | 0,98           |

Симулација ефикасности рада система погонски електромотор–инвертор при различитим бројевима обртаја и оптерећењу је потребна ради прорачуна електричних губитака који настају у погонском систему у фазама убрзавања, вожње константном брзином и регенеративног кочења Е-буса. На основу резултата непосредног мерења на полигону за репрезентативни возни циклус где је крива раста брзине Е-буса до достигања максималне брзине од 44 km·h<sup>-1</sup> имала конвексни облик ( $\beta \approx 0,7$ ), измерене тренутне вредности обртног момента и броја обртаја погонског електромотора Siemens IPV5135-4WS24, унете су на мапу (шкољкасти дијаграм) енергетске ефикасности система електромотор-инвертор,



која је декларисана од стране произвођача Siemens, како је приказано на слици 10.3 [53].



Слика 10.3 Мапа енергетске ефикасности погонских мотора Siemens IPV5135-4WS24 и инвертора уграђених у Е-бус Higer KLQ6125GEV3 [53]

На основу положаја тачака енергетске ефикасности система електромотор-инвертор за различите бројеве обртаја и обртне моменте који су приказани на слици 10.3 добијена је функционална веза између коефицијента корисног дејства система погонски електромотор-инвертор ( $\eta_{em} \cdot \eta_i$ ) и броја обртаја мотора ( $n_o$ ) за приказани режим рада у облику:

$$\eta_{em} \cdot \eta_i = -0,0000000129 \cdot n_o^2 + 0,000121 \cdot n_o + 0,643. \quad (10.5)$$

Добијена функција се описује полиномом другог реда при чему је  $R^2=0,97$ . С обзиром да код симулираних возних циклуса (VCKS.E-bus од 1÷9) криве пораста брзине у фази убрзавања за достизање максималне брзине кретања од  $44 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  имају конвексни облик (слика 10.2), једначина 10.5 може се са довољном тачношћу узети као репрезентативна.

Симулиране вредности напона на суперкондензатору на почетку симулације је  $534 \text{ V}$ , а на крају симулације  $516 \text{ V}$ , што значи да је  $\text{SOC} < 95\%$ , чиме је омогућено да суперкондензатор прихвати целокупну енергију рекулације од система погонски електромотор-инвертор. Симулација кочења Е-буса урађена је на основу симулираних вредности успорења која су сагласна препорученим вредностима успорења аутобуса за градски транспорт. Усвојено је да је стање испитне стазе такво да омогући максимално приањање пнеуматика и асфалтне подлоге (без проклизавања и активирања ABS система). Расподела кочних сила на предњу и погонску осовину израчуната је на основу осовинског оптерећења возила припремљеног за тест. Симулирана је стратегија управљања регенеративним кочењем од стране контролера где се максималне вредности регенеративног кочног момента на погонским точковима остварују на почетку кочења (почетни положаји педале радне кочнице), после чега је приближно линерани пад



регенеративног кочног момента до заустављања. Симулација рада помоћних уређаја (компресор за ваздух, пумпа серво система управљача, нисконапонски потрошачи) урађена је на основу резултата непосредног мерења на Е-бусу који одговарају типичном основном возном циклусу Higer KLQ6125GEV3[52,64].

### 10.3 Симулација рада Е-буса Higer KLQ6125GEV3 на основном возном циклусу

Пример симулације рада Е-буса на основном возном циклусу урађен је на основу улазних техничких карактеристика возила и окружења који су приказани у табели 10.3 и возног циклуса који је дефинисан Симулацијом 7 за вредност нагиба пута  $u=-0,7\%$ , како је приказано у табели 10.4.

Табела 10.4 Карактеристике возног циклуса Е-бус Higer KLQ6125GEV3, Симулација 7

| Редни број | Режим                   | Укупно пређено растојање<br>m | Временски интервал<br>$\Delta t$<br>s | Време вођење<br>$T_v$<br>s | Тренутна брзина<br>$v'_{ebus}$<br>m·s <sup>-1</sup> | Средња брзина<br>$v_{ebus}$<br>m·s <sup>-1</sup> | Тренутна брзина<br>$v'_{ebus}$<br>km·h <sup>-1</sup> | Број путника<br>Z | Нагиб пута<br>u<br>tg( $\alpha$ ) | Тренутно убрзање<br>$a'_{ebus}$<br>m·s <sup>-2</sup> | Тренутно успорење<br>$b'_{ebus}$<br>m·s <sup>-2</sup> |
|------------|-------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|---|--|--|-------------------|-----------------------------------|--|---|
| 1          | стајање                 | 0,00                          | 0,00                                  | 0,00                       | 0,00  | 0,00   | 0,00   | 52                |                                   | 0,000  |   |
| 2          | убрзање                 | 0,35                          | 0,93                                  | 0,93                       | 0,74  | 0,37   | 2,68   | 52                | -0,007                            | 0,798  |   |
| 3          | убрзање                 | 1,71                          | 0,93                                  | 1,87                       | 2,17  | 1,46   | 7,82   | 52                | -0,007                            | 1,531  |   |
| 4          | убрзање                 | 4,33                          | 0,93                                  | 2,80                       | 3,44  | 2,81   | 12,38  | 52                | -0,007                            | 1,356  |   |
| 5          | убрзање                 | 7,96                          | 0,93                                  | 3,73                       | 4,35  | 3,89   | 15,65  | 52                | -0,007                            | 0,975  |   |
| 6          | убрзање                 | 12,38                         | 0,93                                  | 4,67                       | 5,13  | 4,74   | 18,48  | 52                | -0,007                            | 0,842  |   |
| 7          | убрзање                 | 17,49                         | 0,93                                  | 5,60                       | 5,83  | 5,48   | 20,98  | 52                | -0,007                            | 0,744  |   |
| 8          | убрзање                 | 23,24                         | 0,93                                  | 6,53                       | 6,50  | 6,16   | 23,38  | 52                | -0,007                            | 0,716  |   |
| 9          | убрзање                 | 29,58                         | 0,93                                  | 7,46                       | 7,08  | 6,79   | 25,49  | 52                | -0,007                            | 0,626  |   |
| 10         | убрзање                 | 36,49                         | 0,93                                  | 8,40                       | 7,75  | 7,42   | 27,90  | 52                | -0,007                            | 0,720  |   |
| 11         | убрзање                 | 43,99                         | 0,93                                  | 9,33                       | 8,32  | 8,04   | 29,97  | 52                | -0,007                            | 0,614  |   |
| 12         | убрзање                 | 52,04                         | 0,93                                  | 10,26                      | 8,91  | 8,62   | 32,09  | 52                | -0,007                            | 0,633  |   |
| 13         | убрзање                 | 60,62                         | 0,93                                  | 11,20                      | 9,48  | 9,20   | 34,15  | 52                | -0,007                            | 0,611  |   |
| 14         | убрзање                 | 69,71                         | 0,93                                  | 12,13                      | 10,01   | 9,75   | 36,04  | 52                | -0,007                            | 0,565  |   |
| 15         | убрзање                 | 79,29                         | 0,93                                  | 13,06                      | 10,51   | 10,26  | 37,84  | 52                | -0,007                            | 0,535  |   |
| 16         | убрзање                 | 89,31                         | 0,93                                  | 14,00                      | 10,97   | 10,74  | 39,50  | 52                | -0,007                            | 0,495  |   |
| 17         | убрзање                 | 99,75                         | 0,93                                  | 14,93                      | 11,42   | 11,19  | 41,09  | 52                | -0,007                            | 0,474  |   |
| 18         | убрзање                 | 110,60                        | 0,93                                  | 15,86                      | 11,83   | 11,62  | 42,58  | 52                | -0,007                            | 0,443  |   |
| 19         | убрзање                 | 121,82                        | 0,93                                  | 16,79                      | 12,22   | 12,03  | 44,00  | 52                | -0,007                            | 0,422  |   |
| 20         | $v_{ebus}=\text{const}$ | 133,06                        | 0,92                                  | 17,71                      | 12,22   | 12,22  | 44,00  | 52                | -0,007                            | 0,000  |   |
| 21         | $v_{ebus}=\text{const}$ | 144,31                        | 0,92                                  | 18,63                      | 12,22   | 12,22  | 44,00  | 52                | -0,007                            | 0,000  |   |
| 22         | $v_{ebus}=\text{const}$ | 155,55                        | 0,92                                  | 19,55                      | 12,22   | 12,22  | 44,00  | 52                | -0,007                            | 0,000  |   |
| 23         | $v_{ebus}=\text{const}$ | 166,80                        | 0,92                                  | 20,47                      | 12,22   | 12,22  | 44,00  | 52                | -0,007                            | 0,000  |   |
| 24         | кочење                  | 177,83                        | 0,93                                  | 21,40                      | 11,50   | 11,86  | 41,39  | 52                | -0,007                            |  | 0,780   |
| 25         | кочење                  | 188,18                        | 0,93                                  | 22,33                      | 10,76   | 11,13  | 38,75  | 52                | -0,007                            |  | 0,787   |
| 26         | кочење                  | 197,80                        | 0,93                                  | 23,26                      | 9,93  | 10,35  | 35,76  | 52                | -0,007                            |  | 0,894   |
| 27         | кочење                  | 206,66                        | 0,93                                  | 24,19                      | 9,11  | 9,52   | 32,80  | 52                | -0,007                            |  | 0,883   |
| 28         | кочење                  | 214,76                        | 0,93                                  | 25,12                      | 8,31  | 8,71   | 29,92  | 52                | -0,007                            |  | 0,861   |
| 29         | кочење                  | 222,13                        | 0,93                                  | 26,05                      | 7,53  | 7,92   | 27,10  | 52                | -0,007                            |  | 0,843   |
| 30         | кочење                  | 228,80                        | 0,93                                  | 26,98                      | 6,82  | 7,18   | 24,57  | 52                | -0,007                            |  | 0,756   |
| 31         | кочење                  | 234,83                        | 0,93                                  | 27,91                      | 6,14  | 6,48   | 22,10  | 52                | -0,007                            |  | 0,736   |
| 32         | кочење                  | 240,22                        | 0,93                                  | 28,84                      | 5,46  | 5,80   | 19,66  | 52                | -0,007                            |  | 0,731   |
| 33         | кочење                  | 244,99                        | 0,93                                  | 29,77                      | 4,78  | 5,12   | 17,22  | 52                | -0,007                            |  | 0,728   |
| 34         | кочење                  | 249,12                        | 0,93                                  | 30,70                      | 4,12  | 4,45   | 14,82  | 52                | -0,007                            |  | 0,717   |
| 35         | кочење                  | 252,64                        | 0,93                                  | 31,63                      | 3,45  | 3,78   | 12,43  | 52                | -0,007                            |  | 0,714   |
| 36         | кочење                  | 255,54                        | 0,93                                  | 32,56                      | 2,78  | 3,12   | 10,00  | 52                | -0,007                            |  | 0,725   |
| 37         | кочење                  | 257,81                        | 0,93                                  | 33,49                      | 2,10  | 2,44   | 7,58   | 52                | -0,007                            |  | 0,724   |
| 38         | кочење                  | 259,45                        | 0,93                                  | 34,42                      | 1,42  | 1,76   | 5,10   | 52                | -0,007                            |  | 0,739   |
| 39         | кочење                  | 260,45                        | 0,93                                  | 35,35                      | 0,74  | 1,08   | 2,66   | 52                | -0,007                            |  | 0,731   |
| 40         | кочење                  | 260,79                        | 0,93                                  | 36,28                      | 0,00  | 0,37   | 0,0  | 52                | -0,007                            |  | 0,794   |

На основу карактеристика кретања Е-буса према Табели 10.4, улазних техничких карактеристика возила и окружења врши се прорачун отпора кретања Е-буса, обртног момент погонских точкова у фази убрзавања, вожње константном брзином и кочења, биланса снага и губитака и вредности енергије преузете из суперкондензатора и енергије враћене у суперкондензатор у процесу рекуперације коришћењем једначина:

- Отпор котрљања,  $F_f$ , једначина 5.3;
- Отпор ваздуха,  $F_v$ , једначина 5.5;
- Отпор успона,  $F_u$ , једначина 5.6;
- Отпор убрзања (успорења),  $F_a, F_b$ , једначина 5.12;
- Вучна сила,  $F_{vu}$ , једначина 5.1;
- Сила кочења,  $F_{koc}$ , једначина 5.32;
- Обртни момент погонских точкова,  $\sum_{j=3}^4 M_{tj}$ , једначина 5.15;
- Регенеративни кочни момент погонских точкова,  $\sum_{j=3}^4 M_{rkj}$ , једначина 5.38;
- Обртни момент електромотора-режим погона,  $M_{em}$ , једначина 5.21;
- Обртни момент електромотора-режим генератора,  $M_{emr}$ , једначина 5.42;
- Број обртаја електромотора,  $n_o$ , једначина 5.22;
- Коефицијент корисног дејства (ефикасност) система електромотор-инвертор,  $\eta_{em} \cdot \eta_i$ , једначина 10.5;
- Снага Е-буса,  $P_{mov}$ , једначина 5.14;
- Снага електромотора-режим погона,  $P_{em}$ , једначина 5.25;
- Електрични губици у електромотору,  $P_{gem}$ , једначина 5.27;
- Излазна (механичка) снага електромотора,  $P_{emM}$ , једначина 5.28;
- Губици у трансмисији,  $P_{gtr}$ , једначина 5.29;
- Снага електромотора-режим генератора,  $P_{emg}$ , једначина 5.40;
- Електрични губици у електромотору-режим генератора,  $P_{gemr}$ , једначина 5.45;
- Снага рекуперације електромотора,  $P_{emr}$ , једначина 5.46;
- Електрични губици у суперкондензатору и кабловима,  $P_{gbk}$ , 2% од укупно ангажоване снаге свих потрошача;
- Снага суперкондензатора,  $P_{uc}$ , једначина 7.1;
- Потрошена електрична енергија електромотора,  $E_{em}$ , једначина 5.31;
- Електрични губици у електромотору,  $E_{emg}$ , једначина 5.44;
- Електрична енергија рекуперације електромотора,  $E_{emr}$ , једначина 5.48;
- Преузета електрична енергија из суперкондензатора,  $E_{puc}$ , једначина 7.2 и 7.17;
- Враћена електрична енергија у суперкондензатор,  $E_{ruc}$ , једначина 7.3 и 7.18;
- Разлика преузете и враћене електричне енергије у суперкондензатор (потрошена електрична енергија Е-буса),  $\Delta E_{uc}$ , једначина 7.4.

Приказ наведених прорачуна дат је у табелама 10.5, 10.6 и 10.7.

Табела 10.5 Прорачун отпора кретања, обртног момента на погонским точковима, обртног момента електромотора и броја обртаја електромотора за Е-бус Higer KLQ6125GEV3, Симулација 7 ( $u=-0,7\%$ )

| Редни број | $T_v$ | $F_f$ | $F_v$ | $F_u$   | $F_a$   | $F_b$    | $F_{vu}$ | $F_{koc}$ | $\sum_{j=3}^4 M_{tj}$ | $\sum_{j=3}^4 M_{rkj}$ | $M_{em}$ | $M_{emr}$ | $n_o$             |
|------------|-------|-------|-------|---------|---------|----------|----------|-----------|-----------------------|------------------------|----------|-----------|-------------------|
|            | s     | N     | N     | N       | N       | N        | N        | N         | Nm                    | Nm                     | Nm       | Nm        | min <sup>-1</sup> |
| 1          | 0,00  | 776,4 | 0,0   | 0,0     | 0,0     |          | 0,0      |           | 0,0                   |                        | 0,0      |           | 0                 |
| 2          | 0,93  | 782,8 | 0,7   | -1104,6 | 13350,1 |          | 13029,0  |           | 5993,3                |                        | 245,9    |           | 199               |
| 3          | 1,87  | 801,7 | 10,0  | -1104,6 | 25612,8 |          | 25319,9  |           | 11647,2               |                        | 477,9    |           | 781               |
| 4          | 2,80  | 825,2 | 36,9  | -1104,6 | 22685,1 |          | 22442,6  |           | 10323,6               |                        | 423,6    |           | 1502              |
| 5          | 3,73  | 844,1 | 71,1  | -1104,6 | 16311,2 |          | 16121,8  |           | 7416,0                |                        | 304,3    |           | 2085              |
| 6          | 4,67  | 858,8 | 105,4 | -1104,6 | 14086,2 |          | 13945,9  |           | 6415,1                |                        | 263,2    |           | 2539              |
| 7          | 5,60  | 871,7 | 140,9 | -1104,6 | 12446,7 |          | 12354,7  |           | 5683,2                |                        | 233,2    |           | 2935              |
| 8          | 6,53  | 883,5 | 178,1 | -1104,6 | 11978,3 |          | 11935,3  |           | 5490,3                |                        | 225,3    |           | 3299              |
| 9          | 7,46  | 894,4 | 216,2 | -1104,6 | 10472,6 |          | 10478,6  |           | 4820,2                |                        | 197,8    |           | 3635              |
| 10         | 8,40  | 905,3 | 258,0 | -1104,6 | 12045,2 |          | 12103,9  |           | 5567,8                |                        | 228,5    |           | 3971              |
| 11         | 9,33  | 916,2 | 303,1 | -1104,6 | 10271,9 |          | 10386,6  |           | 4777,8                |                        | 196,0    |           | 4304              |
| 12         | 10,26 | 926,3 | 348,6 | -1104,6 | 10589,7 |          | 10760,0  |           | 4949,6                |                        | 203,1    |           | 4616              |
| 13         | 11,20 | 936,4 | 397,1 | -1104,6 | 10221,7 |          | 10450,6  |           | 4807,3                |                        | 197,2    |           | 4926              |
| 14         | 12,13 | 945,9 | 445,9 | -1104,6 | 9452,1  |          | 9739,3   |           | 4480,1                |                        | 183,8    |           | 5220              |
| 15         | 13,06 | 954,8 | 494,1 | -1104,6 | 8950,3  |          | 9294,6   |           | 4275,5                |                        | 175,4    |           | 5495              |
| 16         | 14,00 | 963,2 | 541,4 | -1104,6 | 8281,1  |          | 8681,1   |           | 3993,3                |                        | 163,9    |           | 5752              |
| 17         | 14,93 | 971,0 | 587,9 | -1104,6 | 7929,8  |          | 8384,2   |           | 3856,7                |                        | 158,2    |           | 5994              |
| 18         | 15,86 | 978,5 | 633,7 | -1104,6 | 7411,1  |          | 7918,8   |           | 3642,6                |                        | 149,5    |           | 6223              |
| 19         | 16,79 | 985,5 | 678,5 | -1104,6 | 7059,8  |          | 7619,2   |           | 3504,9                |                        | 143,8    |           | 6439              |
| 20         | 17,71 | 988,9 | 700,9 | -1104,6 | 0,0     |          | 585,2    |           | 269,2                 |                        | 11,0     |           | 6545              |
| 21         | 18,63 | 988,9 | 700,9 | -1104,6 | 0,0     |          | 585,2    |           | 269,2                 |                        | 11,0     |           | 6545              |
| 22         | 19,55 | 988,9 | 700,9 | -1104,6 | 0,0     |          | 585,2    |           | 269,2                 |                        | 11,0     |           | 6545              |
| 23         | 20,47 | 988,9 | 700,9 | -1104,6 | 0,0     |          | 585,2    |           | 269,2                 |                        | 11,0     |           | 6545              |
| 24         | 21,40 | 982,6 | 659,9 | -1104,6 |         | -13049,0 |          | -12511,0  |                       | -3737,3                |          | -136,9    | 6351              |
| 25         | 22,33 | 970,0 | 581,3 | -1104,6 |         | -13166,1 |          | -12719,4  |                       | -3799,5                |          | -139,2    | 5960              |
| 26         | 23,26 | 956,4 | 502,5 | -1104,6 |         | -14956,1 |          | -14601,8  |                       | -4361,9                |          | -159,8    | 5542              |
| 27         | 24,19 | 942,0 | 425,5 | -1104,6 |         | -14772,1 |          | -14509,2  |                       | -4334,2                |          | -158,8    | 5099              |
| 28         | 25,12 | 927,9 | 356,1 | -1104,6 |         | -14404,0 |          | -14224,6  |                       | -3691,2                |          | -135,3    | 4665              |
| 29         | 26,05 | 914,1 | 294,3 | -1104,6 |         | -14102,9 |          | -13999,1  |                       | -3463,7                |          | -126,9    | 4241              |
| 30         | 26,98 | 901,2 | 241,6 | -1104,6 |         | -12647,5 |          | -12609,3  |                       | -3081,8                |          | -112,9    | 3843              |
| 31         | 27,91 | 889,1 | 197,2 | -1104,6 |         | -12312,9 |          | -12331,2  |                       | -2790,6                |          | -102,3    | 3471              |
| 32         | 28,84 | 877,2 | 157,8 | -1104,6 |         | -12229,2 |          | -12298,7  |                       | -2597,7                |          | -95,2     | 3106              |
| 33         | 29,77 | 865,4 | 123,1 | -1104,6 |         | -12179,0 |          | -12295,1  |                       | -2559,8                |          | -93,8     | 2743              |
| 34         | 30,70 | 853,8 | 92,9  | -1104,6 |         | -11995,0 |          | -12152,9  |                       | -2383,5                |          | -87,3     | 2383              |
| 35         | 31,63 | 842,2 | 67,2  | -1104,6 |         | -11944,8 |          | -12140,0  |                       | -2161,2                |          | -79,2     | 2026              |
| 36         | 32,56 | 830,6 | 45,5  | -1104,6 |         | -12128,8 |          | -12357,4  |                       | -1864,3                |          | -68,3     | 1668              |
| 37         | 33,49 | 818,8 | 28,0  | -1104,6 |         | -12112,1 |          | -12369,9  |                       | -1716,9                |          | -62,9     | 1307              |
| 38         | 34,42 | 807,0 | 14,6  | -1104,6 |         | -12363,1 |          | -12646,1  |                       | -1640,8                |          | -60,1     | 943               |
| 39         | 35,35 | 795,1 | 5,4   | -1104,6 |         | -12229,2 |          | -12533,3  |                       | -1588,3                |          | -58,2     | 577               |
| 40         | 36,28 | 782,8 | 0,6   | -1104,6 |         | -13283,2 |          | -13604,4  |                       | 0,0                    |          | 0,0       | 197               |

Табела 10.6 Прорачун енергетске ефикасности система електромотор-инвертор и ангажованих снага: електромотора, кочења, губитака у електромотору, губитака у трансмисији, помоћних уређаја, губитака у кабловима и суперкондензатору и суперкондензатора за Е-бус Higer KLQ6125GEV3, Симулација 7 ( $u=-0,7\%$ )

| Редни број | $T_v$ | $\eta_{em} \cdot \eta_i$ | $P_{emM}$ | $P_{emr}$ | $P_{mov}$ | $P_{koc}$ | $P_{em}$ | $P_{emg}$ | $P_{gem}$ | $P_{gemr}$ | $P_{gtr}$ | $P_{pu}$ | $P_{gbk}$ | $P_{uc}$ |
|------------|-------|--------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|------------|-----------|----------|-----------|----------|
|            | s     |                          | kW        | kW        | kW        | kW        | kW       | kW        | kW        | kW         | kW        | kW       | kW        | kW       |
| 1          | 0,00  |                          | 0,00      |           | 0,00      |           | 0,00     |           | 0,00      |            | 0,00      | 0,00     | 0,00      | 0,00     |
| 2          | 0,93  | 0,663                    | 5,13      |           | 4,85      |           | 7,74     |           | 2,60      |            | 0,28      | 2,33     | 0,21      | 10,56    |
| 3          | 1,87  | 0,726                    | 39,08     |           | 36,94     |           | 53,85    |           | 14,76     |            | 2,15      | 2,34     | 1,17      | 59,50    |
| 4          | 2,80  | 0,791                    | 66,63     |           | 62,96     |           | 84,22    |           | 17,59     |            | 3,66      | 2,35     | 1,80      | 92,03    |
| 5          | 3,73  | 0,834                    | 66,41     |           | 62,76     |           | 79,62    |           | 13,21     |            | 3,65      | 2,35     | 1,71      | 87,34    |
| 6          | 4,67  | 0,861                    | 69,96     |           | 66,11     |           | 81,21    |           | 11,25     |            | 3,85      | 2,35     | 1,75      | 89,15    |
| 7          | 5,60  | 0,881                    | 71,65     |           | 67,71     |           | 81,32    |           | 9,67      |            | 3,94      | 2,34     | 1,75      | 89,36    |
| 8          | 6,53  | 0,895                    | 77,82     |           | 73,54     |           | 86,90    |           | 9,08      |            | 4,28      | 2,33     | 1,87      | 95,38    |
| 9          | 7,46  | 0,906                    | 75,26     |           | 71,12     |           | 83,10    |           | 7,83      |            | 4,14      | 2,31     | 1,79      | 91,34    |
| 10         | 8,40  | 0,913                    | 94,98     |           | 89,76     |           | 104,02   |           | 9,04      |            | 5,22      | 2,32     | 2,23      | 113,80   |
| 11         | 9,33  | 0,918                    | 88,34     |           | 83,49     |           | 96,29    |           | 7,94      |            | 4,86      | 2,33     | 2,07      | 105,54   |
| 12         | 10,26 | 0,919                    | 98,14     |           | 92,75     |           | 106,79   |           | 8,64      |            | 5,40      | 2,34     | 2,29      | 116,82   |
| 13         | 11,20 | 0,918                    | 101,74    |           | 96,14     |           | 110,82   |           | 9,08      |            | 5,60      | 2,35     | 2,38      | 121,14   |
| 14         | 12,13 | 0,915                    | 100,47    |           | 94,94     |           | 109,82   |           | 9,35      |            | 5,53      | 2,37     | 2,35      | 120,07   |
| 15         | 13,06 | 0,910                    | 100,93    |           | 95,38     |           | 110,92   |           | 10,00     |            | 5,55      | 2,37     | 2,38      | 121,22   |
| 16         | 14,00 | 0,903                    | 98,68     |           | 93,25     |           | 109,23   |           | 10,55     |            | 5,43      | 2,36     | 2,34      | 119,36   |
| 17         | 14,93 | 0,896                    | 99,32     |           | 93,85     |           | 110,87   |           | 11,55     |            | 5,46      | 2,36     | 2,37      | 121,06   |
| 18         | 15,86 | 0,887                    | 97,39     |           | 92,03     |           | 109,77   |           | 12,38     |            | 5,36      | 2,35     | 2,35      | 119,83   |
| 19         | 16,79 | 0,878                    | 96,96     |           | 91,62     |           | 110,45   |           | 13,50     |            | 5,33      | 2,34     | 2,36      | 120,49   |
| 20         | 17,71 | 0,873                    | 7,57      |           | 7,15      |           | 8,67     |           | 1,10      |            | 0,42      | 2,32     | 0,23      | 11,41    |
| 21         | 18,63 | 0,873                    | 7,57      |           | 7,15      |           | 8,67     |           | 1,10      |            | 0,42      | 2,32     | 0,23      | 11,41    |
| 22         | 19,55 | 0,873                    | 7,57      |           | 7,15      |           | 8,67     |           | 1,10      |            | 0,42      | 2,34     | 0,23      | 11,43    |
| 23         | 20,47 | 0,873                    | 7,57      |           | 7,15      |           | 8,67     |           | 1,10      |            | 0,42      | 2,35     | 0,23      | 11,44    |
| 24         | 21,40 | 0,882                    |           | -80,29    |           | -148,38   |          | -91,05    |           | 10,76      |           | 2,75     | 1,55      | -75,99   |
| 25         | 22,33 | 0,897                    |           | -77,93    |           | -141,58   |          | -86,88    |           | 8,95       |           | 3,55     | 1,49      | -72,89   |
| 26         | 23,26 | 0,909                    |           | -84,28    |           | -151,12   |          | -92,74    |           | 8,45       |           | 4,32     | 1,60      | -78,36   |
| 27         | 24,19 | 0,916                    |           | -77,71    |           | -138,17   |          | -84,79    |           | 7,08       |           | 4,71     | 1,46      | -71,54   |
| 28         | 25,12 | 0,919                    |           | -60,72    |           | -123,93   |          | -66,06    |           | 5,35       |           | 4,74     | 1,12      | -54,86   |
| 29         | 26,05 | 0,917                    |           | -51,67    |           | -110,87   |          | -56,35    |           | 4,68       |           | 4,75     | 0,94      | -45,98   |
| 30         | 26,98 | 0,911                    |           | -41,37    |           | -90,49    |          | -45,43    |           | 4,06       |           | 4,79     | 0,73      | -35,85   |
| 31         | 27,91 | 0,901                    |           | -33,49    |           | -79,94    |          | -37,16    |           | 3,68       |           | 4,80     | 0,57      | -28,11   |
| 32         | 28,84 | 0,888                    |           | -27,49    |           | -71,33    |          | -30,95    |           | 3,46       |           | 4,81     | 0,45      | -22,23   |
| 33         | 29,77 | 0,872                    |           | -23,49    |           | -62,97    |          | -26,93    |           | 3,45       |           | 4,79     | 0,37      | -18,32   |
| 34         | 30,70 | 0,853                    |           | -18,58    |           | -54,08    |          | -21,79    |           | 3,21       |           | 4,82     | 0,28      | -13,48   |
| 35         | 31,63 | 0,830                    |           | -13,95    |           | -45,94    |          | -16,80    |           | 2,85       |           | 4,80     | 0,18      | -8,97    |
| 36         | 32,56 | 0,804                    |           | -9,60     |           | -38,50    |          | -11,93    |           | 2,34       |           | 4,79     | 0,10      | -4,71    |
| 37         | 33,49 | 0,775                    |           | -6,67     |           | -30,20    |          | -8,61     |           | 1,94       |           | 4,78     | 0,04      | -1,85    |
| 38         | 34,42 | 0,742                    |           | -4,40     |           | -22,27    |          | -5,94     |           | 1,53       |           | 3,75     | 0,01      | -0,64    |
| 39         | 35,35 | 0,705                    |           | -2,48     |           | -13,51    |          | -3,52     |           | 1,04       |           | 2,45     | 0,00      | -0,03    |
| 40         | 36,28 | 0,663                    |           | 0,00      |           | -5,01     |          | 0,00      |           | 0,00       |           | 2,45     | 0,05      | 2,50     |

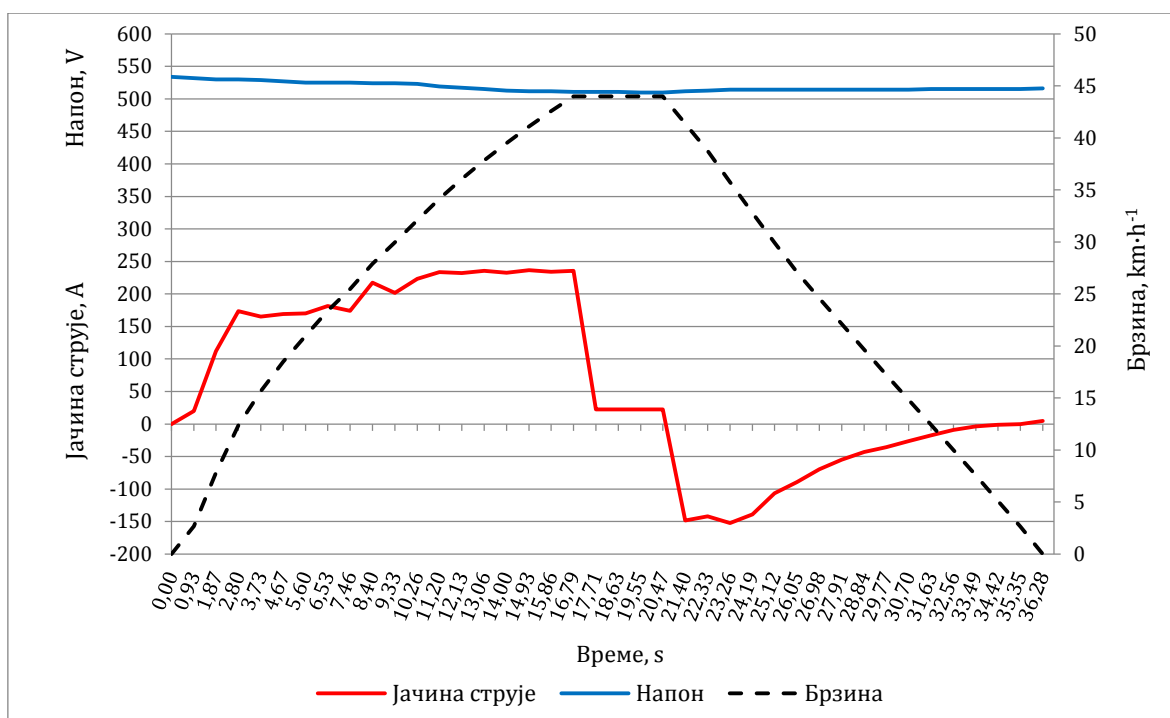
Табела 10.7 Тренутне вредности напона и јачине струје пражњења/пуњења суперкондензатора и енергетски биланс за Е-бус Higer KLQ6125GEV3, Симулација 7 ( $u=-0,7\%$ )

| Редни број | $T_v$ | $U_{uc}$ | $I_{puc}$ | $I_{ruc}$ | $E_{emM}$     | $E_{gem}$     | $E_{gemr}$    | $E_{gtr}$     | $E_{пу}$      | $E_{emg}$      | $E_{gbk}$     |
|------------|-------|----------|-----------|-----------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|---------------|
|            | s     | V        | A         | A         | kWh           | kWh           |               | kWh           | kWh           | kWh            | kWh           |
| 1          | 0,00  | 534      | 0,0       |           | 0,00000       | 0,00000       |               | 0,00000       | 0,00000       |                | 0,00000       |
| 2          | 0,93  | 532      | 19,8      |           | 0,00133       | 0,00067       |               | 0,00007       | 0,00060       |                | 0,00005       |
| 3          | 1,87  | 530      | 112,3     |           | 0,01013       | 0,00383       |               | 0,00056       | 0,00061       |                | 0,00030       |
| 4          | 2,80  | 530      | 173,6     |           | 0,01727       | 0,00456       |               | 0,00095       | 0,00061       |                | 0,00047       |
| 5          | 3,73  | 529      | 165,1     |           | 0,01721       | 0,00342       |               | 0,00095       | 0,00061       |                | 0,00044       |
| 6          | 4,67  | 527      | 169,2     |           | 0,01813       | 0,00292       |               | 0,00100       | 0,00061       |                | 0,00045       |
| 7          | 5,60  | 525      | 170,2     |           | 0,01857       | 0,00251       |               | 0,00102       | 0,00061       |                | 0,00045       |
| 8          | 6,53  | 525      | 181,7     |           | 0,02017       | 0,00235       |               | 0,00111       | 0,00060       |                | 0,00048       |
| 9          | 7,46  | 525      | 174,0     |           | 0,01951       | 0,00203       |               | 0,00107       | 0,00060       |                | 0,00046       |
| 10         | 8,40  | 524      | 217,2     |           | 0,02462       | 0,00234       |               | 0,00135       | 0,00060       |                | 0,00058       |
| 11         | 9,33  | 524      | 201,4     |           | 0,02290       | 0,00206       |               | 0,00126       | 0,00060       |                | 0,00054       |
| 12         | 10,26 | 523      | 223,4     |           | 0,02544       | 0,00224       |               | 0,00140       | 0,00061       |                | 0,00059       |
| 13         | 11,20 | 519      | 233,4     |           | 0,02637       | 0,00235       |               | 0,00145       | 0,00061       |                | 0,00062       |
| 14         | 12,13 | 517      | 232,2     |           | 0,02604       | 0,00242       |               | 0,00143       | 0,00061       |                | 0,00061       |
| 15         | 13,06 | 515      | 235,4     |           | 0,02616       | 0,00259       |               | 0,00144       | 0,00061       |                | 0,00062       |
| 16         | 14,00 | 513      | 232,7     |           | 0,02557       | 0,00273       |               | 0,00141       | 0,00061       |                | 0,00061       |
| 17         | 14,93 | 512      | 236,5     |           | 0,02574       | 0,00299       |               | 0,00142       | 0,00061       |                | 0,00062       |
| 18         | 15,86 | 512      | 234,0     |           | 0,02524       | 0,00321       |               | 0,00139       | 0,00061       |                | 0,00061       |
| 19         | 16,79 | 511      | 235,8     |           | 0,02513       | 0,00350       |               | 0,00138       | 0,00061       |                | 0,00061       |
| 20         | 17,71 | 511      | 22,3      |           | 0,00193       | 0,00028       |               | 0,00011       | 0,00059       | 0,00000        | 0,00006       |
| 21         | 18,63 | 511      | 22,3      |           | 0,00193       | 0,00028       |               | 0,00011       | 0,00059       | 0,00000        | 0,00006       |
| 22         | 19,55 | 510      | 22,4      |           | 0,00193       | 0,00028       |               | 0,00011       | 0,00060       | 0,00000        | 0,00006       |
| 23         | 20,47 | 510      | 22,4      |           | 0,00193       | 0,00028       |               | 0,00011       | 0,00060       | 0,00000        | 0,00006       |
| 24         | 21,40 | 512      |           | -148,4    |               |               | 0,00278       |               | 0,00071       | -0,02352       | 0,00040       |
| 25         | 22,33 | 513      |           | -142,1    |               |               | 0,00231       |               | 0,00092       | -0,02244       | 0,00038       |
| 26         | 23,26 | 514      |           | -152,5    |               |               | 0,00218       |               | 0,00112       | -0,02396       | 0,00041       |
| 27         | 24,19 | 514      |           | -139,2    |               |               | 0,00183       |               | 0,00122       | -0,02190       | 0,00038       |
| 28         | 25,12 | 514      |           | -106,7    |               |               | 0,00138       |               | 0,00122       | -0,01707       | 0,00029       |
| 29         | 26,05 | 514      |           | -89,5     |               |               | 0,00121       |               | 0,00123       | -0,01456       | 0,00024       |
| 30         | 26,98 | 514      |           | -69,7     |               |               | 0,00105       |               | 0,00124       | -0,01174       | 0,00019       |
| 31         | 27,91 | 514      |           | -54,7     |               |               | 0,00095       |               | 0,00124       | -0,00960       | 0,00015       |
| 32         | 28,84 | 514      |           | -43,3     |               |               | 0,00089       |               | 0,00124       | -0,00800       | 0,00012       |
| 33         | 29,77 | 514      |           | -35,7     |               |               | 0,00089       |               | 0,00124       | -0,00696       | 0,00010       |
| 34         | 30,70 | 514      |           | -26,2     |               |               | 0,00083       |               | 0,00125       | -0,00563       | 0,00007       |
| 35         | 31,63 | 515      |           | -17,4     |               |               | 0,00074       |               | 0,00124       | -0,00434       | 0,00005       |
| 36         | 32,56 | 515      |           | -9,1      |               |               | 0,00060       |               | 0,00124       | -0,00308       | 0,00002       |
| 37         | 33,49 | 515      |           | -3,6      |               |               | 0,00050       |               | 0,00123       | -0,00222       | 0,00001       |
| 38         | 34,42 | 515      |           | -1,2      |               |               | 0,00040       |               | 0,00097       | -0,00153       | 0,00000       |
| 39         | 35,35 | 515      |           | -0,1      |               |               | 0,00027       |               | 0,00063       | -0,00091       | 0,00000       |
| 40         | 36,28 | 516      |           | 4,8       |               |               | 0,00000       |               | 0,00063       | 0,00000        | 0,00001       |
|            |       |          |           |           | <b>0,3832</b> | <b>0,0499</b> | <b>0,0188</b> | <b>0,0211</b> | <b>0,0319</b> | <b>-0,1775</b> | <b>0,0122</b> |

Табела 10.7 наставак

| Редни број | $T_v$ | $E_{pus}$     | $E_{pus}(v_{max})$ | $E_{rus}$      | $\Delta E_{uc}$ |
|------------|-------|---------------|--------------------|----------------|-----------------|
|            | s     | kWh           | kWh                | kWh            | kWh             |
| 1          | 0,00  | 0,00000       | 0,00000            |                | 0,00000         |
| 2          | 0,93  | 0,00274       | 0,00274            |                | 0,00274         |
| 3          | 1,87  | 0,01542       | 0,01542            |                | 0,01542         |
| 4          | 2,80  | 0,02385       | 0,02385            |                | 0,02385         |
| 5          | 3,73  | 0,02264       | 0,02264            |                | 0,02264         |
| 6          | 4,67  | 0,02311       | 0,02311            |                | 0,02311         |
| 7          | 5,60  | 0,02316       | 0,02316            |                | 0,02316         |
| 8          | 6,53  | 0,02472       | 0,02472            |                | 0,02472         |
| 9          | 7,46  | 0,02367       | 0,02367            |                | 0,02367         |
| 10         | 8,40  | 0,02949       | 0,02949            |                | 0,02949         |
| 11         | 9,33  | 0,02735       | 0,02735            |                | 0,02735         |
| 12         | 10,26 | 0,03027       | 0,03027            |                | 0,03027         |
| 13         | 11,20 | 0,03139       | 0,03139            |                | 0,03139         |
| 14         | 12,13 | 0,03112       | 0,03112            |                | 0,03112         |
| 15         | 13,06 | 0,03142       | 0,03142            |                | 0,03142         |
| 16         | 14,00 | 0,03093       | 0,03093            |                | 0,03093         |
| 17         | 14,93 | 0,03138       | 0,03138            |                | 0,03138         |
| 18         | 15,86 | 0,03106       | 0,03106            |                | 0,03106         |
| 19         | 16,79 | 0,03123       | 0,03123            |                | 0,03123         |
| 20         | 17,71 | 0,00297       |                    |                | 0,00297         |
| 21         | 18,63 | 0,00297       |                    |                | 0,00297         |
| 22         | 19,55 | 0,00298       |                    |                | 0,00298         |
| 23         | 20,47 | 0,00298       |                    |                | 0,00298         |
| 24         | 21,40 |               |                    | -0,01963       | -0,01963        |
| 25         | 22,33 |               |                    | -0,01883       | -0,01883        |
| 26         | 23,26 |               |                    | -0,02024       | -0,02024        |
| 27         | 24,19 |               |                    | -0,01848       | -0,01848        |
| 28         | 25,12 |               |                    | -0,01417       | -0,01417        |
| 29         | 26,05 |               |                    | -0,01188       | -0,01188        |
| 30         | 26,98 |               |                    | -0,00926       | -0,00926        |
| 31         | 27,91 |               |                    | -0,00726       | -0,00726        |
| 32         | 28,84 |               |                    | -0,00574       | -0,00574        |
| 33         | 29,77 |               |                    | -0,00473       | -0,00473        |
| 34         | 30,70 |               |                    | -0,00348       | -0,00348        |
| 35         | 31,63 |               |                    | -0,00232       | -0,00232        |
| 36         | 32,56 |               |                    | -0,00122       | -0,00122        |
| 37         | 33,49 |               |                    | -0,00048       | -0,00048        |
| 38         | 34,42 |               |                    | -0,00017       | -0,00017        |
| 39         | 35,35 |               |                    | -0,00001       | -0,00001        |
| 40         | 36,28 | 0,00065       |                    | 0,00000        | 0,00065         |
|            |       | <b>0,4775</b> | <b>0,4649</b>      | <b>-0,1379</b> | <b>0,3396</b>   |

Приказ резултата симулације напона, јачине струје пражњења/пуњења на суперкондензатору у функцији времена и брзине кретања Е-буса на примеру Симулације 7, у случају вожње на испитној стази са нагибом (падом) од -0,7% дат је на слици 10.4.



Слика 10.4 Симулација 7, Брзина кретања Е-буса Higer KLQ6125GEV3, тренутне вредности напона и јачине струје суперкондензатора

Симулацијом рада Е-буса Higer KLQ6125GEV3 према задатим основним возним циклусима ( $\beta=1$ ,  $\beta=0,7$ , VCKS.E-bus од 1÷9), добијене су вредности укупно преузете електричне енергије из суперкондензатора ( $E_{puc}$ ) потребне за достизање задате максималне брзине кретања ( $v_{max}$ ) Е-буса и вредности укупне враћене електричне енергије у суперкондензатор ( $E_{ruc}$ ). У табели 10.8 дат је приказ резултата симулације на потпуно равној испитној стази.

Табела 10.8 Резултати симулације рада Е-буса Хигер (KLQ6125GEV3) на основном возном циклусу за достигнуту брзину кретања од 44 km·h<sup>-1</sup>,  $u=0\%$

| $v_{max}=44 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , $u=0\%$ | Пређени пут<br>m | $E_{puc}(v_{max})$<br>kWh | $E_{ruc}$<br>kWh | $\lambda_{uc}$<br>% | $\lambda_{uc_{kin}}$<br>% |
|---|------------------|---------------------------|------------------|---------------------|---------------------------|
| Теоријски возни циклус $\beta=1$                    | 244,23           | 0,5011                    | 0,1223           | 24,41               | 36,65                     |
| Возни циклус $\beta=0,7$                            | 264,11           | 0,5111                    | 0,1204           | 23,56               | 36,08                     |
| Возни циклус E-bus <sub>max</sub>                   | 283,70           | 0,5257                    | 0,1183           | 22,50               | 35,45                     |
| Возни циклус Симулација 1                           | 271,75           | 0,5208                    | 0,1245           | 23,91               | 37,31                     |
| Возни циклус Симулација 2                           | 252,83           | 0,5069                    | 0,1233           | 24,32               | 36,95                     |
| Возни циклус Симулација 3                           | 273,91           | 0,5224                    | 0,1246           | 23,85               | 37,34                     |
| Возни циклус Симулација 4                           | 269,61           | 0,5190                    | 0,1241           | 23,91               | 37,19                     |
| Возни циклус Симулација 5                           | 261,45           | 0,5127                    | 0,1237           | 24,13               | 37,07                     |
| Возни циклус Симулација 6                           | 268,72           | 0,5183                    | 0,1241           | 23,92               | 37,16                     |
| Возни циклус Симулација 7                           | 260,79           | 0,5124                    | 0,1250           | 24,40               | 37,46                     |
| Возни циклус Симулација 8                           | 266,11           | 0,5157                    | 0,1235           | 23,95               | 37,01                     |
| Возни циклус Симулација 9                           | 267,47           | 0,5151                    | 0,1218           | 23,65               | 36,50                     |
| <b>Просечна вредност (1÷9)</b>                      | <b>265,85</b>    | <b>0,5159</b>             | <b>0,1238</b>    | <b>24,00</b>        | <b>37,11</b>              |

У случају да је испитна стаза са нагибом (падом) од -0,7%, резултати симулације су приказани у табели 10.9.

Табела 10.9 Резултати симулације рада Е-бус Хигер (KLQ6125GEV3) на основном возном циклусу за достигнуту брзину кретања од  $44 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,  $u=-0,7\%$ 

| $v_{max}=44 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , $u=-0,7\%$ | Пређени пут<br>m | $E_{puc}(v_{max})$<br>kWh | $E_{ruc}$<br>kWh | $\lambda_{uc}$<br>% | $\lambda_{uc_{kin}}$<br>% |
|--|------------------|---------------------------|------------------|---------------------|---------------------------|
| Теоријски возни циклус $\beta=1$                       | 244,23           | 0,4608                    | 0,1356           | 29,43               | 40,64                     |
| Возни циклус $\beta=0,7$                               | 264,11           | 0,4642                    | 0,1339           | 28,85               | 40,13                     |
| Возни циклус E-bus <sub>max</sub>                      | 283,70           | 0,4716                    | 0,1321           | 28,01               | 39,59                     |
| Возни циклус Симулација 1                              | 271,75           | 0,4692                    | 0,1375           | 29,31               | 41,20                     |
| Возни циклус Симулација 2                              | 252,83           | 0,4631                    | 0,1364           | 29,45               | 40,88                     |
| Возни циклус Симулација 3                              | 273,91           | 0,4699                    | 0,1376           | 29,28               | 41,23                     |
| Возни циклус Симулација 4                              | 269,61           | 0,4684                    | 0,1371           | 29,27               | 41,08                     |
| Возни циклус Симулација 5                              | 261,45           | 0,4654                    | 0,1368           | 29,39               | 40,99                     |
| Возни циклус Симулација 6                              | 268,72           | 0,4681                    | 0,1371           | 29,29               | 41,08                     |
| Возни циклус Симулација 7                              | 260,79           | 0,4649                    | 0,1379           | 29,66               | 41,32                     |
| Возни циклус Симулација 8                              | 266,11           | 0,4668                    | 0,1367           | 29,28               | 40,96                     |
| Возни циклус Симулација 9                              | 267,47           | 0,4665                    | 0,1352           | 28,98               | 40,52                     |
| <b>Просечна вредност (1÷9)</b>                         | <b>265,85</b>    | <b>0,4669</b>             | <b>0,1369</b>    | <b>29,32</b>        | <b>41,03</b>              |

На основу резултата симулације вредности електричне енергије која је враћена у суперкондензатор и укупно преузете електричне енергије из суперкондензатора изражене преко коефицијента ефикасности рекулације ( $\lambda_{uc}$ ) што је дефинисано једначином 7.7 и коефицијента  $\lambda_{uc_{kin}}$  као односа енергије која је враћена у суперкондензатор и кинетичке енергије од 0,3337 kWh које је возило поседовало у моменту почетка кочења (једначина 7.9), проистиче да је највећа вредност наведених коефицијената постигнута у возном циклусу који је остварен Симулацијом 7, где су вредности  $\lambda_{uc} = 24,40\%$  и  $\lambda_{uc_{kin}} = 37,46\%$ , за случај  $u=0\%$ , односно  $\lambda_{uc} = 29,66\%$  и  $\lambda_{uc_{kin}} = 41,32\%$  за случај  $u=-0,7\%$ .

Анализом резултата симулације закључује се да је најмања потрошња електричне енергије у фази убрзавања Е-буса код теоријског возног циклуса  $\beta=1$  а највећа код возног циклуса E-bus<sub>max</sub> из чега се закључује да са становишта минималне потрошње електричне енергије у фази убрзања Е-буса, реални возни циклуси требају да теже теоријском возном циклусу  $\beta=1$ .

Познато је да је потрошња електричне енергије у фази убрзавања Е-буса односно енергија рекулације која настаје у фази регенеративног кочења директно зависна од радних перформанси погонских мотора (обртни момент, снага) који се остварују при одређеном броју обртаја и енергетској ефикасности погонског мотора.

У том смислу анализирани су резултати разлике преузете електричне енергије из суперкондензатора за достизање брзина:  $30 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,  $35 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,  $40 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,  $44 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  и враћене електрична енергије у суперкондензатор при кочењу од:  $30 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,  $35 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,  $40 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  и  $44 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  до заустављања код возног циклуса симулираног у Симулацији 7 за случај  $u=0\%$  и  $u=-0,7\%$ .

Приказ добијених резултата за случај вожње на равној испитној стази представљено је у табели 10.10 а у варијанти вожње на стази која је у паду од  $-0,7\%$  у табели 10.11.



Табела 10.10 Преузета и враћена електрична енергија у суперкондензатор за различите максималне брзине кретања Е-буса Higer KLQ6125GEV3, Симулација 7,  $u=0\%$ 

|                                    |               |               |               |               |
|------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| $v_{max}$ , km·h <sup>-1</sup>     | 30            | 35            | 40            | 44            |
| $E_{puc}(v_{max})$ , kWh           | 0,2336        | 0,3179        | 0,4172        | 0,5124        |
| $E_{ruc}$ , kWh                    | 0,0544        | 0,0851        | 0,1154        | 0,1250        |
| $E_{puc}(v_{max}) - E_{ruc}$ , kWh | <b>0,1792</b> | <b>0,2328</b> | <b>0,3018</b> | <b>0,3874</b> |

 Табела 10.11 Преузета и враћена електрична енергија у суперкондензатор за различите максималне брзине кретања Е-буса Higer KLQ6125GEV3, Симулација 7,  $u=-0,7\%$ 

|                                    |               |               |               |               |
|------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| $v_{max}$ , km·h <sup>-1</sup>     | 30            | 35            | 40            | 44            |
| $E_{puc}(v_{max})$ , kWh           | 0,2161        | 0,2926        | 0,3812        | 0,4649        |
| $E_{ruc}$ , kWh                    | 0,0607        | 0,0940        | 0,1273        | 0,1379        |
| $E_{puc}(v_{max}) - E_{ruc}$ , kWh | <b>0,1554</b> | <b>0,1986</b> | <b>0,2539</b> | <b>0,3270</b> |

Приказани резултати доказују да вредности  $E_{puc}(v_{max}) - E_{ruc}$  имају значајне разлике за различите достигнуте брзине кретања Е-буса. Најбољи резултат наведеног показатеља, када је разлика најмања, односно енергетска ефикасност највећа, остварује се при максималној брзини од 30 km·h<sup>-1</sup>. Када је присутан пад на испитној стази  $u=-0,7\%$ , вредност  $E_{puc}(v_{max}) - E_{ruc}$  износи 0,1554 kWh, односно 0,1792 kWh за  $u=0\%$ , што је значајно мање у поређењу са вредностима при већим максималним брзинама. Према препорукама произвођача аутобуса Higer [85] које су наведене у Поглављу 7, највећа енергетска ефикасност Е-буса се постиже при брзинама кретања од 30÷35 km·h<sup>-1</sup>, што је доказано у табелама 10.10 и 10.11.

При достизању оптималне брзине кретања Е-буса (30÷35 km·h<sup>-1</sup>), режим рада погонских електромотора је у зони највеће енергетске ефикасности што се манифестује на вредности  $E_{puc}(v_{max})$  и  $E_{ruc}$ .

#### 10.4 Поређење резултата мерења и симулације рада Е-буса Higer KLQ6125GEV3 на основном возном циклусу

На полигонском испитивању [53] урађено је мерење преузете и враћене електричне енергије у суперкондензатор Е-буса Higer KLQ6125GEV3 за сваки остварени возни циклус. За потребе симулације коришћени су елементи испитног возног циклуса "27Б" који одговара коефицијенту  $\beta \approx 0,7$  са равномерним кочењем. У наредној табели дати су упоредни резултати преузете и враћене електричне енергије у суперкондензатор добијених мерењем и Симулацијом бр.7.

 Табела 10.12 Упоредни приказ резултата мерења и Симулације бр.7 преузете и враћене електричне енергије у суперкондензатор за возни циклус "27Б" ( $u=-0,7\%$ )

|                                | Мерење "27Б" | Симулација "7" | Одступање % |
|--------------------------------|--------------|----------------|-------------|
| $v_{max}$ , km·h <sup>-1</sup> | 44           | 44             |             |
| $E_{puc}(v_{max})$ , kWh       | 0,4700       | 0,4649         | 1,09        |
| $E_{ruc}$ , kWh                | 0,1390       | 0,1379         | 0,79        |

Из табеле 10.12 произилази закључак да су разлике између измерених и симулираних вредности преузете и враћене електричне енергије у суперкондензатор за достизање задате брзине кретања Е-буса од 44 km·h<sup>-1</sup> за возни циклус "27Б" минималне. Процентуална разлика преузете електричне

енергије из суперкондензатора,  $E_{pus}(v_{max})$  при достизању максималне брзине кретања од  $44 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  је  $1,09\%$ . Процентуална разлика враћене електричне енергије у суперкондензатор  $E_{ruc}$  је  $0,79\%$ . Резултати симулације основног возног циклуса потврђују део полазне *Хипотезе 5* да добијени резултати преузете и враћене електричне енергије у суперкондензатор имају висок степен подударности са резултатима непосредног мерења.

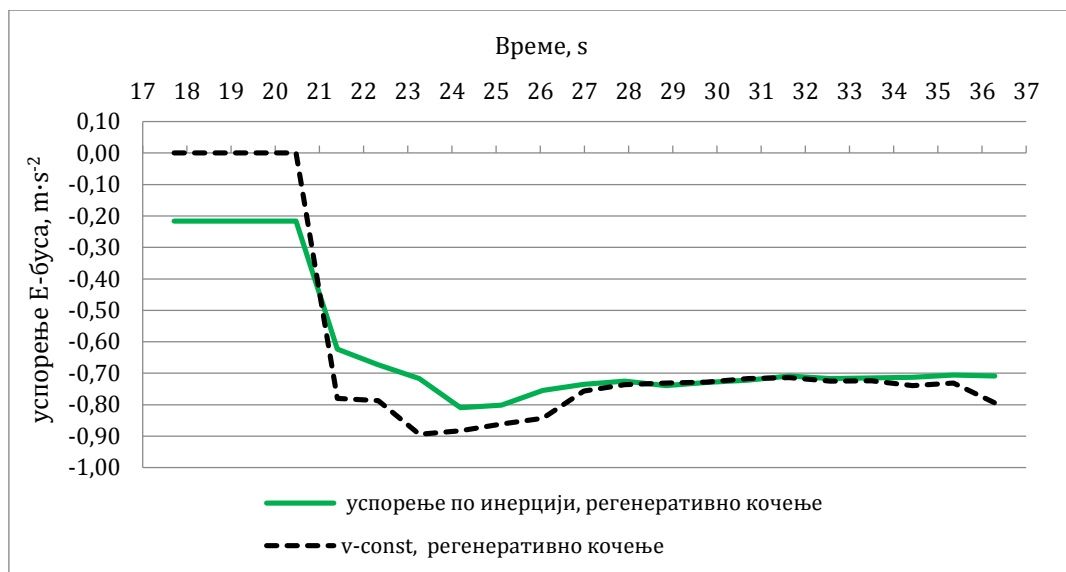
### 10.5 Симулација рада Е-буса Higer KLQ6125GEV3 на основном возном циклусу при кретању возила по инерцији

Основни возни циклус који је приказан у тачки 10.1 подразумевао је да када Е-бус достигне задату брзину од  $44 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , она се одржава одређени временски интервал пре почетка кочења. Често се у реалној експлоатацији догађа када се достигне задата брзина кретања, возач отпусти педалу гаса али не притиска педалу радне кочице. У таквом режиму возило се креће по инерцији са успорењем као последица кочног (регенеративног) момента електромотора. Према подацима произвођача аутобуса Higer [85] кочни момент који настаје при кретању по инерцији на равном путу износи  $34 \text{ Nm}$ , што иницира успорење Е-буса од око  $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ . На примеру возног циклуса Симулације 7, ако се користи регенеративно кочење при кретању Е-буса по инерцији након достизања максималне брзине од  $44 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  и ако се достигнута брзина одржава одређени временски период представљено је на слици 10.5.



Слика 10.5 Основни возни циклус кретања Е-буса са успорењем по инерцији и без успорења по инерцији, Симулација 7

Вредности тренутних убрзања за достизање брзине од  $44 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  идентичне су вредностима приказаним у Симулацији 7. С обзиром да након достизања максималне брзине од  $44 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  делује регенеративни кочни момент долази до смањења брзине на  $41,14 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  пре него што се активира педала радне кочице. Упоредни приказ тренутних вредности успорења у случају кочења по инерцији до заустављања и у случају одржавања максималне брзине кретања и кочења до заустављања је приказано на слици 10.6.



Слика 10.6 Тренутне вредности успорења Е-буса при кретању по инерцији и кочењу, и без кретања по инерцији, Симулација 7

Ефекти коришћења регенеративног кочења са аспекта рекулације електричне енергије када се након достизања максималне брзине од 44 km·h<sup>-1</sup> возило креће по инерцији а после тога кочи на примеру возног циклуса Симулација 7, приказано је у табели 10.13.

Табела 10.13 Преузета и враћена електрична енергија у суперкондензатор за случај кретања по инерцији и кочења Е-буса Higer KLQ6125GEV3, Симулација 7,  $\mu=0\%$

| Ознака, јединица               | Кретање по инерцији | Кочење након достизања $v_{max}$ |
|--------------------------------|---------------------|----------------------------------|
| $v_{max}$ , km·h <sup>-1</sup> | 44                  | 44                               |
| $E_{puc}(v_{max})$ , kWh       | 0,5124              | 0,5124                           |
| $E_{ruc}$ , kWh                | 0,1272              | 0,1250                           |
| $\lambda_{uc}$ , %             | 24,82               | 24,40                            |
| $\lambda_{uckin}$ , %          | 38,12               | 37,46                            |

Резултати доказују да у случају кретања Е-буса по инерцији, након достигнуте максималне брзине кретања од 44 km·h<sup>-1</sup>, пре фазе кочења, добијен је бољи ефекат посматрано са становишта враћене електричне енергије рекулације у суперкондензатор ( $E_{ruc}$ ) у поређењу са случајем када се возило креће константном максималном брзином пре фазе кочења за 1,76%. Вредност коефицијената  $\lambda_{uc}$  је у случају кретања по инерцији за 1,72% већа у односу на случај када се возило креће константном максималном брзином пре фазе кочења.

## 10.6 Моделирање и симулација рада Е-буса Higer KLQ6125GEV3 на градској линији јавног градског транспорта

Рад аутобуса на линији јавног градског транспорта карактеришу одређене специфичности у погледу карактеристика токова путника на линији који су различити на сваком међустаничном растојању, карактеристика трасе и саобраћајних услова који су присутни током рада, посматрано посебно за смер "А"

и смер "Б". За израду модела возног циклуса неопходно је познавање наведених специфичности. Елементи за моделирање возног циклуса са свако међустанично растојање на линији, за сваки смер кретања су:

Статички и динамички елементи линије:

- дужина трасе,  $L_{A,B}$ , km,
- број станица;  $n_{stA,B} (n_1, n_2, \dots, n_k, n_{k+1}, \dots, n_{nA,B})$ ,
- међустанична растојања,  $n_k, n_{k+1}$ , m,
- надморска висина стајалишта, m,
- нагиб (успон/пад) пута између станица,  $u$ , %,
- време вожње између станица  $T_{v(n_k, n_{k+1})}$ , S,
- време стајања на станицама  $T_{vss(n_1, n_2, \dots, n_n)}$ , S,
- број семафора на међустаничном растојању, вероватноћа проласка на зелено светло,
- пешачки прелази, кружни ток, "лежећи полицајац" на међустаничном растојању.

Карактеристике путничког тока на линији:

- проток путника (број путника у возилу) за свако међу станично растојање  $Z_{(n_k, n_{k+1})}$ .

Статички елементи (дужина трасе, број станица, међустанична растојања, надморске висине стајалишта, број семафора) су унапред дефинисани и могу се преузети из даљинара линије. Динамички елементи (време вожње, време стајања на станицама) се добијају непосредним мерењем на линији као и број путника у возилу. У табели 10.14 и 10.15 дат је приказ статичких и динамичких елемената за линију ЕКО 1 (Вуков споменик-Насеље Белвил) у Београду која је предмет моделирања и симулације рада Е-буса.

Табела 10.14 Динамички и статички елементи моделирања за линију ЕКО 1, смер "А", поподневно вршино оптерећење

| Смер "А", станице          | Време стајања на станици<br>s | Време вожње<br>s | Међустанично растојање<br>m | Надморска висина станице<br>m | Број путника у возилу | Нагиб % |
|----------------------------|-------------------------------|------------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------|---------|
| Вуков споменик             | 14                            |                  | 0                           | 132                           | 15                    |         |
| Технички факултети         | 26                            | 158              | 504                         | 134                           | 25                    | 0,4     |
| Правни факултет            | 24                            | 126              | 419                         | 134                           | 35                    | 0,0     |
| Ташмајдан                  | 14                            | 121              | 300                         | 134                           | 41                    | 0,0     |
| Главна пошта               | 28                            | 95               | 248                         | 135                           | 47                    | 0,4     |
| Пионирски парк             | 18                            | 105              | 350                         | 124                           | 51                    | -3,14   |
| Зелени венац               | 48                            | 232              | 795                         | 109                           | 55                    | -1,89   |
| Бранков мост               | 41                            | 101              | 415                         | 97                            | 54                    | -2,89   |
| Блок 21                    | 35                            | 203              | 1548                        | 80                            | 48                    | -1,1    |
| Милентија Поповића         | 16                            | 95               | 432                         | 78                            | 42                    | -0,46   |
| Блок 25                    | 14                            | 135              | 664                         | 78                            | 36                    | 0,0     |
| Блок 24                    | 14                            | 74               | 398                         | 77                            | 28                    | -0,25   |
| Милутина Миланковића       | 19                            | 88               | 374                         | 75                            | 22                    | -0,53   |
| Депо "Сава"                | 10                            | 160              | 720                         | 75                            | 16                    | 0,0     |
| Ђорђа Станојевића (Белвил) | 18                            | 60               | 310                         | 74                            | 0                     | -0,32   |

Табела 10.15 Динамички и статички елементи моделирања за линију ЕКО 1, смер "Б", поподневно вршно оптерећење

| Смер "Б", станице       | Време стајања на станици<br>s | Време вожње<br>s | Међустанично растојање<br>m | Надморска висина станице<br>m | Број путника у возилу | Нагиб % |
|-------------------------|-------------------------------|------------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------|---------|
| Борђа Станојевића (ГСП) | 11                            |                  | 0                           | 74                            | 12                    |         |
| Airport city            | 12                            | 127              | 725                         | 74                            | 14                    | 0,00    |
| Омладинских бригада     | 13                            | 105              | 463                         | 73                            | 15                    | -0,22   |
| Булевар уметности       | 11                            | 91               | 387                         | 73                            | 17                    | 0,00    |
| Шпанских бораца         | 11                            | 62               | 430                         | 76                            | 20                    | 0,70    |
| Милутина Миланковића    | 12                            | 112              | 580                         | 77                            | 24                    | 0,17    |
| Блок 24                 | 11                            | 40               | 210                         | 78                            | 27                    | 0,48    |
| Блок 25                 | 11                            | 115              | 490                         | 78                            | 29                    | 0,00    |
| Милентија Поповића      | 14                            | 110              | 577                         | 77                            | 40                    | -0,17   |
| Блок 21                 | 34                            | 131              | 434                         | 78                            | 52                    | 0,23    |
| Бранков мост            | 30                            | 203              | 1531                        | 99                            | 56                    | 1,37    |
| Зелени венац            | 46                            | 95               | 346                         | 109                           | 50                    | 2,89    |
| Пионирски парк          | 45                            | 255              | 910                         | 124                           | 44                    | 1,65    |
| Ресавска                | 23                            | 105              | 320                         | 134                           | 34                    | 3,13    |
| Правни факултет         | 20                            | 150              | 420                         | 134                           | 22                    | 0,00    |
| Технички факултети      | 14                            | 120              | 330                         | 134                           | 11                    | 0,00    |
| Вуков споменик          | 13                            | 97               | 360                         | 132                           | 0                     | -0,56   |

Динамички елементи (времена вожње између станица, времена стајања на станицама) и број путника у возилу односе се на поподневно вршно оптерећење рада Е-буса. Вредности у табели представљају средње вредности које су добијене снимањем већег броја вожњи које су се реализовале у поподневном вршном оптерећењу, преузимањем података система за бројање путника (Поглавље 6, тачка 6.5). Возни циклус на међустаничном растојању је најчешће сложен и састоји од одређеног броја основних циклуса.

Идеални случај је када на међустаничном растојању нема семафора, пешачких прелаза и када је траса за кретање у потпуности намењена за аутобусе. У том случају возни циклус је основни (прост) који се састоји само од фазе убрзавања, вожње константном брзином и кочења, како је детаљно приказано у тачки 10.1. У супротном ако постоје семафори, пешачки прелази, кружни токови дуж међустаничног растојања или засићеност саобраћајног тока, тада постоји вероватноћа да ће се аутобус зауставити једном или више пута, што возни циклус чини сложеним. Што је возни циклус сложенији, постоји већи број циклуса убрзавања, кочења и стајања, што се неповољно одражава на потрошњу електричне енергије Е-буса.

Вероватноћа проласка кроз зелено светло на семафорисаним раскрсницама је независан случајан догађај, условљен дужином трајања зеленог светла, зависно од сигналног плана и приоритета, који се намењује саобраћајном току. У највећем броју случаја саобраћајнице куда се крећу возила јавног градског транспорта имају приоритет у односу на саобраћајнице са којим се укрштају. Ако постоји више семафорисаних раскрсница на једном међустаничном растојању, на основу укупне вероватноће проласка кроз зелена светла, могуће је одредити из колико основних циклуса се састоји сложени возни циклус на конкретном међустаничном растојању.

За илустрацију методологије одређивања броја основних циклуса који чине један сложен циклус биће приказан следећи пример за смер "А". На међустаничном растојању од станица "Вуков споменик-Технички факултети" налазе се три

семафора. Непосредним снимањем пролазака Е-буса на зелено светло, односно стајање на црвено светло, које је обављено 10.03.2020. године у периоду 15:00÷17:30, добијени су следећи исходи:

Табела 10.16 Исходи пролазака Е-буса на међустаничном растојању "Вуков споменик-Технички факултети", смер "А", поподневно вршно оптерећење

| Е-бус г.б.    | Семафор 1 | Семафор 2 | Семафор 3 | Број основних циклуса |
|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------------------|
| 2104          | Црвено    | Зелено    | Црвено    | 3                     |
| 2102          | Зелено    | Зелено    | Црвено    | 2                     |
| 2103          | Зелено    | Црвено    | Црвено    | 3                     |
| 2101          | Црвено    | Црвено    | Зелено    | 3                     |
| 2104          | Црвено    | Зелено    | Црвено    | 3                     |
| 2102          | Црвено    | Црвено    | Зелено    | 3                     |
| 2103          | Црвено    | Зелено    | Зелено    | 2                     |
| 2101          | Црвено    | Зелено    | Зелено    | 2                     |
| 2104          | Црвено    | Црвено    | Црвено    | 4                     |
| <b>Укупно</b> |           |           |           | <b>25</b>             |

Из табеле 10.16 се закључује да је исход у посматраном периоду за 9 случаја наиласка Е-буса укупна реализација 25 основних циклуса, просечна вредност је 2,77 односно може се закључити да се сложени возни циклус на овом међустаничном растојању састоји из два или три основна возна циклуса.

С обзиром да је вероватноћа исхода са три возна циклуса  $p_{cik3}=0,555$  а вероватноћа са два возна циклуса  $p_{cik2}=0,333$  у периоду слепоподневног вршног оптерећења меродавни број основних возних циклуса је три.

Приказ броја основних циклуса за свако међустанично растојање на основу изложене методологије посматрано по смеровима кретања дат је у табелама 10.17 и 10.18.

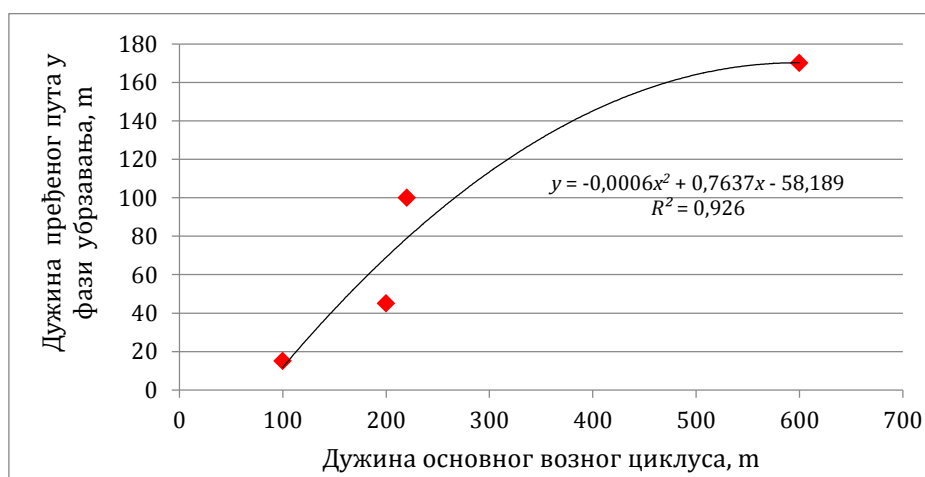
Табела 10.17 Карактеристике возног циклуса на линији ЕКО 1, смер "А", поподневно вршно оптерећење

| Смер "А", станице       | Међустанично растојање m | Број семафорисаних раскрсница | Очекивани број основних циклуса | Дужина основног возног циклуса (убрз.+конст.+кочење) $S_{ub}+S_{const}+S_{коџ}$ m |
|-------------------------|--------------------------|-------------------------------|---------------------------------|---|
| Вуков споменик          | 0                        |                               |                                 |   |
| Технички факултети      | 504                      | 3                             | 3                               | 168,0   |
| Правни факултет         | 419                      | 2                             | 2                               | 209,5   |
| Ташмајдан               | 300                      | 3                             | 2                               | 150,0   |
| Главна пошта            | 248                      | 2                             | 2                               | 124,0   |
| Пионирски парк          | 350                      | 1                             | 2                               | 175,0   |
| Зелени венац            | 795                      | 3                             | 4                               | 198,7   |
| Бранков мост            | 415                      | 2                             | 2                               | 207,5   |
| Блок 21                 | 1548                     | 2                             | 3                               | 516,0   |
| М. Поповића             | 432                      | 2                             | 2                               | 216,0   |
| Блок 25                 | 664                      | 2                             | 3                               | 221,3   |
| Блок 24                 | 398                      | 0                             | 2                               | 199,0   |
| М. Миланковића          | 374                      | 1                             | 2                               | 187,0   |
| Депо "Сава"             | 720                      | 3                             | 3                               | 240,0   |
| Б. Станојевића (Белвил) | 310                      | 1                             | 1                               | 310,0   |

Табела 10.18 Карактеристике возног циклуса на линији ЕКО 1, смер "Б",  
поподневно вршно оптерећење

| Смер "Б", станице    | Међустанично растојање<br>m | Број семафорисаних раскрсница | Очекивани број основних циклуса | Дужина основног Возног циклуса (убрз.+конст.+кочење)<br>$S_{Sub}+S_{const}+S_{коџ}$<br>m |
|----------------------|-----------------------------|-------------------------------|---------------------------------|--|
| Ђ. Станојевића (ГСП) | 0                           |                               |                                 |  |
| Airport city         | 725                         | 3                             | 3                               | 241,6  |
| Омладинских бригада  | 463                         | 2                             | 2                               | 231,5  |
| Булевар уметности    | 387                         | 1                             | 2                               | 193,5  |
| Шпанских бораца      | 430                         | 0                             | 1                               | 430,0  |
| М. Миланковића       | 580                         | 2                             | 2                               | 290,0  |
| Блок 24              | 210                         | 0                             | 1                               | 210,0  |
| Блок 25              | 490                         | 1                             | 2                               | 245,0  |
| М. Поповића          | 577                         | 1                             | 2                               | 288,5  |
| Блок 21              | 434                         | 2                             | 2                               | 217,0  |
| Бранков мост         | 1531                        | 2                             | 2                               | 765,5  |
| Зелени венац         | 346                         | 2                             | 2                               | 173,0  |
| Пионирски парк       | 910                         | 3                             | 4                               | 227,5  |
| Ресавска             | 320                         | 2                             | 2                               | 160,0  |
| Правни факултет      | 420                         | 3                             | 3                               | 140,0  |
| Технички факултети   | 330                         | 3                             | 2                               | 165,0  |
| Вуков споменик       | 360                         | 1                             | 2                               | 180,0  |

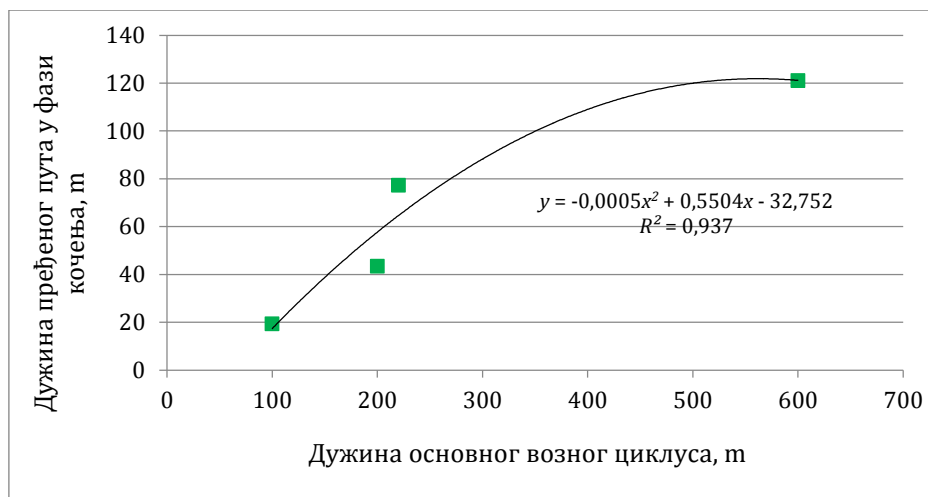
На основу очекиваног броја циклуса за свако међустанично растојање израчуната је дужина основног возног циклуса која обухвата пут убрзања, пут вожње са константном брзином и пут кочења. Дужина основног возног циклуса је "идеална" дужина која подразумева да су семафори равномерно распоређени на међустаничном растојању. У следећем кораку потребно је израчунати пут убрзања, пут вожње са константном брзином и пут кочења. На основу методологије SORT 1 и SORT 2 [132], усвојиће се дужина пређеног пута у фази убрзавања у зависности од укупне дужине основног возног циклуса када се достижу брзине кретања од  $20 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,  $30 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,  $40 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  и  $50 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . Функционална зависност пређеног пута у фази убрзавања у односу на укупну дужину основног возног циклуса приказана је на слици 10.7.



Слика 10.7 Зависност дужине пута у фази убрзавања Е-буса у односу на укупну дужину основног возног циклуса

Функционална зависност пређеног пута у фази кочења у односу на укупну дужину основног возног циклуса приказана је на слици 10.8.





Слика 10.8 Зависност дужине пута у фази кочења Е-буса у односу на укупну дужину основног возног циклуса

У оба случаја зависност пређеног пута у фази убрзавања односно кочења описује се функцијом полинома другог реда са високим коефицијентом корелације  $R^2=0,926$  и  $R^2=0,937$ . У табели 10.19 приказане су вредности дужине пута убрзања, пута где се возило креће константном брзином и пута кочења за основни циклус на сваком међустаничном растојању за смер "А".

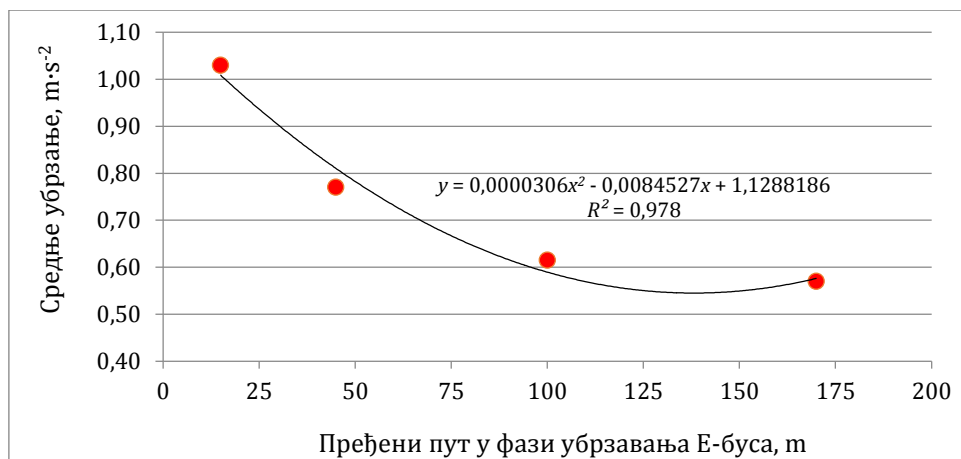
Дужина пређеног пута када се Е-бус креће константном брзином  $S_{const}$  израчуната је када се од укупне дужине основног возног циклуса одузме пређени пут у фази убрзавања  $S_{ub}$  и пређени пут у фази кочења  $S_{коџ}$ .

Табела 10.19 Дужине пута у фази убрзавања, константне брзине и кочења на основном возном циклусу, смер "А", поподневно вршно оптерећење

| Смер "А", станице       | Дужина основног<br>Возног циклуса<br>(убрз.+конст.+кочење)<br>$S_{ub}+S_{const}+S_{коџ}$<br>m | Пређени пут у<br>фази убрзавања<br>$S_{ub}$<br>m | Пређени<br>пут при<br>$V_{bus}=const,$<br>$S_{const}$<br>m | Пређени<br>пут у фази<br>кочења<br>$S_{коџ}$<br>m |
|-------------------------|---|--|--|---|
| Буков споменик          |   |  |  |   |
| Технички факултети      | 168,0   | 32,45  | 90,0   | 45,54   |
| Правни факултет         | 209,5   | 61,60  | 87,4   | 60,53   |
| Ташмајдан               | 150,0   | 24,09  | 87,4   | 38,50   |
| Главна пошта            | 124,0   | 16,58  | 79,7   | 27,76   |
| Пионирски парк          | 175,0   | 36,40  | 90,4   | 48,19   |
| Зелени венац            | 198,7   | 52,73  | 89,2   | 56,81   |
| Бранков мост            | 207,5   | 59,88  | 87,8   | 59,85   |
| Блок 21                 | 516,0   | 138,00   | 260,1  | 117,92  |
| М. Поповића             | 216,0   | 67,41  | 85,9   | 62,72   |
| Блок 25                 | 221,3   | 72,44  | 84,4   | 64,49   |
| Блок 24                 | 199,0   | 52,92  | 89,2   | 56,90   |
| М. Миланковића          | 187,0   | 44,08  | 90,3   | 52,62   |
| Депо "Сава"             | 240,0   | 91,81  | 77,7   | 70,45   |
| Ђ. Станојевића (Белвил) | 310,0   | 138,00   | 82,3   | 89,70   |

У следећем кораку потребно је одредити вредности средњег убрзања које ће Е-бус остварити зависно од израчунатог пута на ком се Е-бус убрзава. На основу методологије SORT 1 и SORT 2 [132], зависност средњег убрзања у функцији пређеног пута приказана је на слици 10.9.





Слика 10.9 Средње убрзања Е-буса у функцији пређеног пута према SORT 1 и SORT 2

Приказана функционална зависност описана је степеном функцијом другог реда са високим коефицијентом корелације  $R^2=0,978$ . Добијене вредности средњег убрзања су препоручене вредности према методологији SORT 1 и SORT 2 које су најприхватљивије за режим рада аутобуса у јавном градском транспорту. У пракси вредност убрзања има случајни карактер зависно од стила возње (економичан, лаган, агресиван) и услова саобраћаја. У симулационом моделу потребно је симулирати случајне вредности средњег убрзања за основне циклусе, које ће бити у границама  $\pm 15\%$  од препоручених вредности убрзања које су приказане степеном функцијом на слици 10.9, коришћењем функције генератора случајних бројева =RANDBETWEEN у програму MS Office Excel 2007, како је приказано изразом:

$$a_{sr} = a_{sort} + (a_{sort} \cdot (\text{RANDBETWEEN}(-15,15)/100)) \quad (10.6)$$

где је:

$a_{sr}$  – симулација средњег убрзања Е-буса,  $m \cdot s^{-2}$ ,

$a_{sort}$  – препоручено убрзање Е-буса према SORT 1 и SORT 2,  $m \cdot s^{-2}$ .

Препоручена вредност успорења Е-буса у фази кочења је  $0,8 m \cdot s^{-2}$ , дефинисана методологијом SORT 1 и SORT 2, без обзира да дужину пута кочења. У симулационом моделу средња вредност успорења на основном циклусу у фази кочења може се симулирати као случајна вредност у границама  $-20\%$  до  $+5\%$  од препоручене вредности успорења, коришћењем функције генератора случајних бројева =RANDBETWEEN у програму MS Office Excel 2007, како је приказано изразом:

$$b_{sr} = 0,8 + (0,8 \cdot (\text{RANDBETWEEN}(-20,5)/100)) \quad (10.7)$$

где је:

$b_{sr}$  – симулација средњег успорења Е-буса,  $m \cdot s^{-2}$ .

Симулиране вредности средњег успорења налазе се у границама од  $0,64 m \cdot s^{-2}$  до  $0,84 m \cdot s^{-2}$ , што је реално за услове возње на линијама јавног градског транспорта.

На основу израчунатих вредности пређеног пута у фази убрзавања и кочења и симулираних средњих вредности убрзања и успорења добијене су вредности времена које је потребно за убрзање, кретање константном брзином и кочење. Време потребно да би се прешао дефинисани пут у фази убрзавања израчунава се према једначини:

$$t_{ubr} = \sqrt{\frac{2S_{ub}}{a_{sr}}}, \quad (10.8)$$

где је:

$t_{ubr}$  – време убрзавања, s.

Максимална брзина коју Е-бус достиже у фази убрзања израчунава се према изразу:

$$v_{ebus_{max}} = a_{sr} \cdot t_{ubr}. \quad (10.9)$$

Време које Е-бус проведе са константном достигнутом максималном брзином израчунава се према једначини:

$$t_{const} = \frac{S_{const}}{v_{ebus_{const}}}. \quad (10.10)$$

Време потребно да се Е-бус заустави од максималне брзине кретања до  $v_{ebus} = 0$ , израчунава се као:

$$t_{коџ} = \frac{v_{ebus_{max}}}{b_{sr}}, \quad (10.11)$$

где је:

$t_{коџ}$  – време кочења, s.

На основу симулираних вредности средњих убрзања и успорења добијена су времена у фази убрзавања, вожње са константном брзином и времена кочења, како је приказано у табелама 10.20 и 10.21 као и остварене брзине на међустаничним растојањима.

Табела 10.20 Симулација убрзања, успорења, времена убрзавања, времена вожње константном брзином, времена коचेња, брзине кретања на основном возном циклусу, смер "А", последодневни шпиз

| Смер "А", станице       | Време доласка hhamss | Време поласка hhamss | Време стајања на станици s | Време стајања semaфор:застој s | tubr s | tconst s | tкоџ s | Време вожње (Tv) s | Време укретања (Tvk) s | Међуст.брзина m·s <sup>-1</sup> | Максимална брзина вожње m·s <sup>-1</sup> | Просечна брзина у фази убрзања m·s <sup>-1</sup> | Средње убрзање m·s <sup>-2</sup> | Средње успорење m·s <sup>-2</sup> |
|-------------------------|----------------------|----------------------|----------------------------|--------------------------------|--------|----------|--------|--------------------|------------------------|---------------------------------|---|--|----------------------------------|-----------------------------------|
| Вуков споменик          | 15:00:00             | 15:00:14             | 14                         |                                |        |          |        |                    |                        |                                 |   |  |                                  |                                   |
| Технички факултет       | 15:02:52             | 15:03:18             | 26                         | 66:81                          | 8:84   | 12:27    | 9:29   | 158                | 91:19                  | 3:19                            | 7:34                                      | 3:67   | 0:83                             | 0:79                              |
| Правни факултет         | 15:05:24             | 15:05:48             | 24                         | 55:11                          | 12:82  | 9:09     | 13:54  | 126                | 70:89                  | 3:33                            | 9:61                                      | 4:81   | 0:75                             | 0:71                              |
| Ташмајдан               | 15:07:49             | 15:08:03             | 14                         | 64:01                          | 6:91   | 12:53    | 9:06   | 121                | 56:99                  | 2:48                            | 6:98                                      | 3:49   | 1:01                             | 0:77                              |
| Главна пошта            | 15:09:38             | 15:10:06             | 28                         | 40:05                          | 5:70   | 13:69    | 8:08   | 95                 | 54:95                  | 2:61                            | 5:82                                      | 2:91   | 1:02                             | 0:72                              |
| Пионирски парк          | 15:11:51             | 15:12:09             | 18                         | 42:98                          | 9:04   | 11:23    | 10:73  | 105                | 62:02                  | 3:33                            | 8:05                                      | 4:02   | 0:89                             | 0:75                              |
| Зелени венац            | 15:16:01             | 15:16:49             | 48                         | 95:97                          | 11:78  | 9:97     | 12:26  | 232                | 136:03                 | 3:43                            | 8:95                                      | 4:48   | 0:76                             | 0:73                              |
| Бранков мост            | 15:18:30             | 15:19:11             | 41                         | 34:01                          | 12:31  | 9:02     | 12:16  | 101                | 66:99                  | 4:11                            | 9:73                                      | 4:86   | 0:79                             | 0:80                              |
| Блок 21                 | 15:22:34             | 15:23:09             | 35                         | 20:08                          | 21:27  | 20:04    | 19:66  | 203                | 182:92                 | 7:63                            | 12:98                                     | 6:49   | 0:61                             | 0:66                              |
| М. Поповића             | 15:24:44             | 15:25:00             | 16                         | 21:55                          | 14:08  | 8:97     | 13:68  | 95                 | 73:45                  | 4:55                            | 9:58                                      | 4:79   | 0:68                             | 0:70                              |
| Блок 25                 | 15:27:15             | 15:27:29             | 14                         | 21:26                          | 14:60  | 8:50     | 14:81  | 135                | 113:74                 | 4:92                            | 9:93                                      | 4:96   | 0:68                             | 0:67                              |
| Блок 24                 | 15:28:43             | 15:28:57             | 14                         | 5:36                           | 11:72  | 9:88     | 12:72  | 74                 | 68:64                  | 5:38                            | 9:03                                      | 4:51   | 0:77                             | 0:71                              |
| М. Миланковића          | 15:30:25             | 15:30:44             | 19                         | 21:31                          | 10:18  | 10:43    | 12:73  | 88                 | 66:69                  | 4:25                            | 8:66                                      | 4:33   | 0:85                             | 0:68                              |
| Дело "Сава"             | 15:33:24             | 15:33:34             | 10                         | 38:74                          | 17:21  | 7:29     | 15:93  | 160                | 121:26                 | 4:50                            | 10:67                                     | 5:33   | 0:62                             | 0:67                              |
| Ђ. Станојевића (Белвил) | 15:34:34             | 15:34:52             | 18                         | 12:35                          | 23:26  | 6:94     | 17:45  | 60                 | 47:65                  | 5:17                            | 11:86                                     | 5:93   | 0:51                             | 0:68                              |

Табела 10.21 Симулација убрзања, успорења, времена убрзавања, времена вожње константном брзином, времена кочења, брзине кретања на основном возном циклусу, смер "Б", последодневни шпиз

| Смер "Б", станице   | Време доласка hhamss | Време поласка hhamss | Време стајања на станици s | Време стајања semaфор:застој s | tubr s | tconst s | tкоџ s | Време вожње (Tv) s | Време укретања (Tvk) s | Међуст.брзина m·s <sup>-1</sup> | Максимална брзина вожње m·s <sup>-1</sup> | Просечна брзина у фази убрзања m·s <sup>-1</sup> | Средње убрзање m·s <sup>-2</sup> | Средње успорење m·s <sup>-2</sup> |
|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------------|--------------------------------|--------|----------|--------|--------------------|------------------------|---------------------------------|---|--|----------------------------------|-----------------------------------|
| Ђ.Станојевића (ЦСП) | 15:40:00             | 15:40:11             | 11                         |                                |        |          |        |                    |                        |                                 |   |  |                                  |                                   |
| Airport city        | 15:42:18             | 15:42:30             | 12                         | 5:89                           | 17:73  | 7:73     | 14:90  | 127                | 121:11                 | 5:71                            | 10:28                                     | 5:14   | 0:58                             | 0:69                              |
| Омладинских бргада  | 15:44:15             | 15:44:28             | 13                         | 25:93                          | 16:96  | 7:61     | 14:97  | 105                | 79:07                  | 4:41                            | 10:18                                     | 5:09   | 0:60                             | 0:68                              |
| Булевар уметности   | 15:45:59             | 15:46:10             | 11                         | 23:07                          | 13:84  | 7:39     | 12:74  | 91                 | 67:93                  | 4:25                            | 9:68                                      | 4:84   | 0:70                             | 0:76                              |
| Шпанских бораца     | 15:47:12             | 15:47:23             | 11                         | 6:22                           | 27:51  | 13:82    | 14:44  | 62                 | 55:78                  | 6:94                            | 11:56                                     | 5:78   | 0:42                             | 0:80                              |
| М. Миланковића      | 15:49:15             | 15:49:27             | 12                         | 26:14                          | 20:62  | 8:48     | 13:83  | 112                | 85:86                  | 5:18                            | 10:93                                     | 5:46   | 0:53                             | 0:79                              |
| Блок 24             | 15:50:07             | 15:50:18             | 11                         | 4:99                           | 14:91  | 7:27     | 12:83  | 40                 | 35:01                  | 5:25                            | 10:14                                     | 5:07   | 0:68                             | 0:79                              |
| Блок 25             | 15:52:13             | 15:52:24             | 11                         | 35:70                          | 18:89  | 8:17     | 12:59  | 115                | 79:30                  | 4:26                            | 9:82                                      | 4:91   | 0:52                             | 0:78                              |
| Блок 21             | 15:54:14             | 15:54:28             | 14                         | 21:36                          | 21:60  | 8:89     | 13:83  | 110                | 88:64                  | 5:25                            | 10:37                                     | 5:18   | 0:48                             | 0:75                              |
| Блок 21             | 15:56:39             | 15:57:13             | 34                         | 52:96                          | 16:81  | 7:95     | 14:26  | 131                | 78:04                  | 3:31                            | 9:41                                      | 4:71   | 0:56                             | 0:66                              |
| Бранков мост        | 16:00:36             | 16:01:06             | 30                         | 34:38                          | 28:45  | 39:71    | 16:15  | 203                | 168:62                 | 7:54                            | 11:95                                     | 5:97   | 0:42                             | 0:74                              |
| Зелени венац        | 16:02:41             | 16:03:27             | 46                         | 32:07                          | 12:29  | 7:67     | 11:51  | 95                 | 62:93                  | 3:64                            | 9:09                                      | 4:55   | 0:74                             | 0:79                              |
| Пионирски парк      | 16:07:42             | 16:08:27             | 45                         | 97:30                          | 18:75  | 8:52     | 12:16  | 255                | 157:70                 | 3:57                            | 9:00                                      | 4:50   | 0:48                             | 0:74                              |
| Ресавка             | 16:10:12             | 16:10:35             | 23                         | 44:62                          | 11:45  | 8:14     | 10:59  | 105                | 60:38                  | 3:05                            | 8:48                                      | 4:24   | 0:74                             | 0:80                              |
| Правни факултет     | 16:13:05             | 16:13:25             | 20                         | 59:03                          | 10:19  | 9:49     | 10:64  | 150                | 90:97                  | 2:80                            | 7:24                                      | 3:62   | 0:71                             | 0:68                              |
| Технички факултет   | 16:15:25             | 16:15:39             | 14                         | 57:95                          | 11:95  | 8:05     | 11:03  | 120                | 62:05                  | 2:75                            | 8:60                                      | 4:30   | 0:72                             | 0:78                              |
| Вуков споменик      | 16:17:16             | 16:17:29             | 13                         | 28:98                          | 13:66  | 8:03     | 12:31  | 97                 | 68:02                  | 3:71                            | 8:74                                      | 4:37   | 0:64                             | 0:71                              |

Моделирање техничких перформанси аутобуса на електрични погон Higer KLQ6125GEV3 у условима реалних услова рада на линији јавног градског транспорта засновано је на техничким карактеристикама возила које су приказане у табели 10.3, при чему се узима у обзир да оптерећеност са бројем путника није константна вредност, као у случају моделирања и симулације рада на полигону, већ се мења на сваком међустаничном растојању и смеру кретања, што је приказано у табелама 10.14 и 10.15. Такође, на свакој деоници постоје различити нагиби (успон/пад) пута, као и остварене максималне брзине кретања возила.

Коришћењем једначина теорије кретања и регенеративног кочења Е-буса које су приказане у Поглављу 5 и Поглављу 7, извршен је прорачун потребних снага и утрошене електричне енергије за савлађивање отпора кретања Е-буса у фази убрзања и вожње са константном брзином, као и снаге кочења и рекуперације за основни возни циклус који је моделиран на датом међустаничном растојању. Израчунате вредности наведених величина за основни возни циклус представљају просечне вредности које су добијене на основу усвојених средњих вредности брзине кретања, убрзања, успорења и времена вожње Е-буса, која су дефинисана за дати основни возни циклус за свако међустанично растојање.

Просечна ангажована снага рада помоћних уређаја на возилу (компресор за ваздух, пумпа хидро-погона, ниско напонски потрошачи) на једном међустаничном растојању усвојене су на основу непосредних мерења која су рађена на Е-буса Higer KLQ6125GEV3 [52,64].

У симулацији рада Е-буса Higer KLQ6125GEV3 на линији јавног градског транспорта, зависно од карактеристичног периода рада (први поласци, период међувршног оптерећења и јутарње и поподневно вршно оптерећење), односно ако је возило неоптерећено или оптерећено, просечна вредност коефицијента ротирајућих маса возила је  $\delta = 1,03 \div 1,045$  а коефицијента ефикасности погонског мотора зависно од стила вожње и оптерећења у режиму убрзања  $\eta_{em} = 0,88 \div 0,92$  а у режиму рекуперације  $\eta_{em,r} = 0,86 \div 0,91$ .

Добијене вредности потрошене и енергије рекуперације за основни возни циклус потребно је помножити бројем основних циклуса који се реализују на датом међустаничном растојању. С обзиром да се вредности потрошене и енергије рекуперације за основни возни циклус израчунавају на основу просечних вредности брзине кретања, убрзања, успорења, коефицијента  $\delta$ ,  $\eta_{em}$ ,  $\eta_{em,r}$ ,  $\eta_t$  и времена вожње, погрешан избор вредности наведених величина могу утицати да резултати симулације имају значајна одступања од резултата мерења.

### **10.7 Резултати симулација рада Е-буса Higer KLQ6125GEV3 на линији ЕКО1 (Вуков споменик-Насеље Белвил), пролећно-јесењи период**

Пример симулација рада Е-буса Higer KLQ6125GEV3 (SimE-bus) на линији ЕКО 1 урађен је за карактеристични период рада у току дана током пролећно-јесењег периода:

- Поподневно вршно оптерећење када је присутан највећи број путника на линији и најдуже време превоза (путовања) због утицаја саобраћајних услова.

Као меродавна спољна температура за пролећно-јесењи период усвојена је температура од 18 °C , што подразумева да није коришћен систем за хлађење путничког простора Е-буса.

На основу улазних елемената потребних за моделирање и симулацију рада Е-буса Niger KLQ6125GEV3 на линији ЕКО 1 који су представљени у табелама 10.14; 10.15; 10.17; 10.18; 10.19; 10.20; 10.21, добијени су резултати симулације за пролећно-јесењи период експлоатације. Резултати једне од симулација за смер "А", приказани су у табелама 10.22 и 10.23.

Табела 10.22 Резултати потрошње електричне енергије Е-буса на линији ЕКО 1, смер "А", поподневно вршно оптерећење, пролећно-јесењи период, Симулација 1-а

| Смер "А", станице       | $E_{emM}$<br>KWh | $E_{gem}$<br>KWh | $E_{gtr}$<br>KWh | $E_{пу}$<br>KWh | $E_{ac}$<br>KWh | $E_h$<br>KWh | $E_{gbk}$<br>KWh | $E_{пус}$<br>KWh | $E_{рус}$<br>KWh | $\Delta E_{uc}$<br>KWh |
|-------------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|--------------|------------------|------------------|------------------|------------------------|
| Вуков споменик          |                  |                  |                  |                 |                 |              |                  |                  |                  |                        |
| Технички факултети      | 0,450            | 0,096            | 0,024            | 0,130           | 0,000           | 0,000        | 0,015            | 0,715            | -0,001           | 0,714                  |
| Правни факултет         | 0,450            | 0,100            | 0,025            | 0,099           | 0,000           | 0,000        | 0,016            | 0,690            | -0,133           | 0,558                  |
| Ташмајдан               | 0,263            | 0,058            | 0,014            | 0,085           | 0,000           | 0,000        | 0,010            | 0,430            | -0,070           | 0,359                  |
| Главна пошта            | 0,228            | 0,048            | 0,012            | 0,078           | 0,000           | 0,000        | 0,008            | 0,373            | -0,042           | 0,331                  |
| Пионирски парк          | 0,214            | 0,083            | 0,012            | 0,082           | 0,000           | 0,000        | 0,012            | 0,403            | -0,250           | 0,152                  |
| Зелени венац            | 1,084            | 0,226            | 0,058            | 0,188           | 0,000           | 0,000        | 0,034            | 1,589            | -0,229           | 1,360                  |
| Бранков мост            | 0,321            | 0,112            | 0,019            | 0,093           | 0,000           | 0,000        | 0,016            | 0,562            | -0,321           | 0,241                  |
| Блок 21                 | 1,089            | 0,287            | 0,063            | 0,181           | 0,000           | 0,000        | 0,040            | 1,661            | -0,566           | 1,095                  |
| Милентија Поповића      | 0,437            | 0,102            | 0,025            | 0,082           | 0,000           | 0,000        | 0,015            | 0,662            | -0,161           | 0,501                  |
| Блок 25                 | 0,776            | 0,173            | 0,044            | 0,118           | 0,000           | 0,000        | 0,025            | 1,135            | -0,231           | 0,904                  |
| Блок 24                 | 0,393            | 0,090            | 0,022            | 0,068           | 0,000           | 0,000        | 0,013            | 0,586            | -0,129           | 0,458                  |
| М. Миланковића          | 0,319            | 0,076            | 0,018            | 0,078           | 0,000           | 0,000        | 0,011            | 0,503            | -0,116           | 0,387                  |
| Депо "Сава"             | 0,811            | 0,181            | 0,046            | 0,131           | 0,000           | 0,000        | 0,026            | 1,195            | -0,242           | 0,953                  |
| Ђ. Станојевића (Белвил) | 0,301            | 0,069            | 0,017            | 0,057           | 0,000           | 0,000        | 0,010            | 0,454            | -0,105           | 0,350                  |
|                         | <b>7,136</b>     | <b>1,702</b>     | <b>0,400</b>     | <b>1,470</b>    | <b>0,000</b>    | <b>0,000</b> | <b>0,252</b>     | <b>10,959</b>    | <b>-2,596</b>    | <b>8,364</b>           |

Табела 10.23 Рекапитулација резултата симулације 1-а, рада Е-буса Niger KLQ6125GEV3 на линији ЕКО 1, смер "А", поподневно вршно оптерећење, пролећно-јесењи период

| Симулација 1-а  | Кретање | Стајање | Укупно       |
|---|---------|---------|--------------|
| Смер "А" - ЕКО 1 (Вуков споменик-Насеље Белвил)   |         |         |              |
| Време превоза (путовања), $T_{pA}$ , hh:mm:ss   | 0:20:13 | 0:14:39 | 0:34:52      |
| Средња дужина трасе, $L_A$ , km   | 7,477   |         | 7,477        |
| Превозна брзина, $v_{pA}$ , km·h <sup>-1</sup>  |         |         | 12,867       |
| Потрошена (излазна) електрична енергија погонског система, $E_{emM}$ , kWh  | 7,136   |         | 7,136        |
| Потрошена електрична енергија за рад помоћних уређаја на возилу, $E_{пу}$ , kWh                                       | 0,940   | 0,530   | 1,470        |
| Електрични губици погонског система, $E_{gem}$ , kWh  | 1,702   |         | 1,702        |
| Губици у трансмисији, $E_{gtr}$ , kWh   | 0,400   |         | 0,400        |
| Губици у суперкондензатору и кабловима, $E_{gbk}$ , kWh   | 0,242   | 0,010   | 0,252        |
| Потрошена електрична енергија за рад система за хлађење, $E_{ac}$ , kWh   | 0,000   | 0,000   | 0,000        |
| Потрошена електрична енергија за рад система за грејање, $E_h$ , kWh  | 0,000   | 0,000   | 0,000        |
| Укупно враћена електрична енергија у суперкондензатор, $E_{русA}$ , kWh   | 2,596   |         | 2,596        |
| Укупно преузета електрична енергија из суперкондензатора, $E_{пусA}$ , kWh  | 10,419  | 0,540   | 10,959       |
| Укупно потрошена електрична енергија Е-буса, $E_{ebusA}$ , kWh  |         |         | 8,364        |
| Коефицијент ефикасности рекуперације, $\lambda_{ucA}$ , %   |         |         | 23,685       |
| <b>Просечна потрошња електричне енергије Е-буса, <math>E_{ebusLA}</math>, kWh·km<sup>-1</sup></b>                     |         |         | <b>1,119</b> |
| <b>Просечна потрошња електричне енергије Е-буса са губитком пуњења, <math>E'_{ebusLA}</math>, kWh·km<sup>-1</sup></b> |         |         | <b>1,175</b> |

Резултати симулације за смер "Б", приказани су у табелама 10.24 и 10.25.

Табела 10.24 Резултати потрошње електричне енергије Е-буса на линији ЕКО 1, смер "Б", поподневно вршно оптерећење, пролећно-јесењи период, Симулација 1-б

| Смер "Б", станице    | $E_{em}$<br>KWh | $E_{gem}$<br>KWh | $E_{gtr}$<br>KWh | $E_{pu}$<br>KWh | $E_{ac}$<br>KWh | $E_h$<br>KWh | $E_{gbk}$<br>KWh | $E_{pus}$<br>KWh | $E_{rus}$<br>KWh | $\Delta E_{uc}$<br>KWh |
|----------------------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|--------------|------------------|------------------|------------------|------------------------|
| Ђ. Станојевића (ГСП) |                 |                  |                  |                 |                 |              |                  |                  |                  |                        |
| Airport city         | 0,725           | 0,161            | 0,041            | 0,113           | 0,000           | 0,000        | 0,023            | 1,064            | -0,164           | 0,900                  |
| Омладинских бригада  | 0,450           | 0,103            | 0,026            | 0,082           | 0,000           | 0,000        | 0,015            | 0,676            | -0,149           | 0,527                  |
| Булевар уметности    | 0,429           | 0,096            | 0,024            | 0,072           | 0,000           | 0,000        | 0,014            | 0,636            | -0,134           | 0,502                  |
| Шпанских бораца      | 0,421           | 0,087            | 0,023            | 0,050           | 0,000           | 0,000        | 0,013            | 0,593            | -0,090           | 0,503                  |
| М. Миланковића       | 0,601           | 0,131            | 0,034            | 0,088           | 0,000           | 0,000        | 0,020            | 0,873            | -0,176           | 0,697                  |
| Блок 24              | 0,273           | 0,059            | 0,015            | 0,036           | 0,000           | 0,000        | 0,009            | 0,391            | -0,073           | 0,318                  |
| Блок 25              | 0,482           | 0,107            | 0,027            | 0,086           | 0,000           | 0,000        | 0,016            | 0,718            | -0,149           | 0,570                  |
| Милентија Поповића   | 0,520           | 0,117            | 0,029            | 0,086           | 0,000           | 0,000        | 0,017            | 0,770            | -0,172           | 0,598                  |
| Блок 21              | 0,496           | 0,108            | 0,028            | 0,106           | 0,000           | 0,000        | 0,017            | 0,754            | -0,133           | 0,622                  |
| Бранков мост         | 1,799           | 0,345            | 0,085            | 0,157           | 0,000           | 0,000        | 0,051            | 2,436            | -0,200           | 2,236                  |
| Зелени венац         | 0,780           | 0,147            | 0,040            | 0,088           | 0,000           | 0,000        | 0,023            | 1,078            | -0,084           | 0,995                  |
| Пионирски парк       | 1,371           | 0,267            | 0,073            | 0,195           | 0,000           | 0,000        | 0,041            | 1,948            | -0,201           | 1,747                  |
| Ресавска             | 0,692           | 0,129            | 0,035            | 0,081           | 0,000           | 0,000        | 0,020            | 0,957            | -0,064           | 0,894                  |
| Правни факултет      | 0,411           | 0,091            | 0,023            | 0,110           | 0,000           | 0,000        | 0,014            | 0,650            | -0,113           | 0,537                  |
| Технички факултети   | 0,355           | 0,079            | 0,020            | 0,084           | 0,000           | 0,000        | 0,013            | 0,550            | -0,108           | 0,442                  |
| Вуков споменик       | 0,297           | 0,071            | 0,017            | 0,076           | 0,000           | 0,000        | 0,011            | 0,471            | -0,112           | 0,360                  |
|                      | <b>10,103</b>   | <b>2,097</b>     | <b>0,539</b>     | <b>1,511</b>    | <b>0,000</b>    | <b>0,000</b> | <b>0,317</b>     | <b>14,567</b>    | <b>-2,120</b>    | <b>12,448</b>          |

Табела 10.25 Рекапитулација резултата симулације 1-б, рада Е-буса Niger KLQ6125GEV3 на линији ЕКО 1, смер "Б", поподневно вршно оптерећење, пролећно-јесењи период

| Симулација 1-б  |  | Кретање | Стајање | Укупно       |
|---|--|---------|---------|--------------|
| Смер "Б" - ЕКО 1 (Вуков споменик-Насеље Белвил)   |  |         |         |              |
| Време превоза (путовања), $T_{PB}$ , hh:mm:ss   |  | 0:22:41 | 0:14:48 | 0:37:29      |
| Средња дужина трасе, $L_B$ , km   |  | 8,633   |         | 8,633        |
| Превозна брзина, $v_{PB}$ , km·h <sup>-1</sup>  |  |         |         | 13,819       |
| Потрошена (излазна) електрична енергија погонског система, $E_{em}$ , kWh                             |  | 10,103  |         | 10,103       |
| Потрошена електрична енергија за рад помоћних уређаја на возилу, $E_{pu}$ , kWh                       |  | 0,977   | 0,534   | 1,511        |
| Електрични губици погонског система, $E_{gem}$ , kWh  |  | 2,097   |         | 2,097        |
| Губици у трансмисији, $E_{gtr}$ , kWh   |  | 0,539   |         | 0,539        |
| Губици у суперкондензатору и кабловима, $E_{gbk}$ , kWh   |  | 0,306   | 0,011   | 0,317        |
| Потрошена електрична енергија за рад система за хлађење, $E_{ac}$ , kWh                               |  | 0,000   | 0,000   | 0,000        |
| Потрошена електрична енергија за рад система за грејање, $E_h$ , kWh                                  |  | 0,000   | 0,000   | 0,000        |
| Укупно враћена електрична енергија у суперкондензатор, $E_{rus}$ , kWh                                |  | 2,120   |         | 2,120        |
| Укупно преузета електрична енергија из суперкондензатора, $E_{pus}$ , kWh                             |  | 14,022  | 0,545   | 14,567       |
| Укупно потрошена електрична енергија Е-буса, $E_{ebusB}$ , kWh  |  |         |         | 12,448       |
| Коефицијент ефикасности рекулације, $\lambda_{ucB}$ , %   |  |         |         | 14,552       |
| Просечна потрошња електричне енергије Е-буса, $E_{ebusLB}$ , kWh·km <sup>-1</sup>                     |  |         |         | <b>1,442</b> |
| Просечна потрошња електричне енергије Е-буса са губитком пуњења, $E'_{ebusLB}$ , kWh·km <sup>-1</sup> |  |         |         | <b>1,514</b> |

Приказани резултати симулације представљају пример једне вожње у смеру "А" и смеру "Б". Свака вожња у реалном систему је непоновљив догађај. Коришћењем функције случајних бројева симулирани су различити сценарији броја путника, времена вожње и времена стајања на станицама са одступањем до  $\pm 10\%$  у односу на средње вредности приказане у претходном примеру (табеле 10.14 и 10.15).

Резултати 34 симулације за смер "А", приказани су у табели 10.26.

Табела 10.26 Резултати симулације рада Е-буса Niger KLQ6125GEV3 на линији ЕКО 1, смер "А", поподневно вршно оптерећење, пролећно-јесењи период

| ЕКО 1<br>Смер "А" | $T_{pA}$<br>hh:mm:ss | $E_{p_{ucA}}$<br>kWh | $E_{r_{ucA}}$<br>kWh | $\Delta E_{ucA}$<br>kWh | $\lambda_{ucA}$<br>% | $E'_{ebus_{LA}}$<br>kWh·km <sup>-1</sup> |
|-------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|--|
| симулација 1-а    | 0:34:52              | 10,959               | 2,596                | 8,364                   | 23,685               | 1,175                                    |
| симулација 2-а    | 0:35:59              | 10,760               | 2,805                | 7,955                   | 26,069               | 1,117                                    |
| симулација 3-а    | 0:34:52              | 10,647               | 2,761                | 7,886                   | 25,929               | 1,107                                    |
| симулација 4-а    | 0:34:24              | 10,845               | 2,830                | 8,015                   | 26,094               | 1,126                                    |
| симулација 5-а    | 0:34:56              | 11,479               | 2,736                | 8,743                   | 23,834               | 1,228                                    |
| симулација 6-а    | 0:34:49              | 10,767               | 2,792                | 7,975                   | 25,932               | 1,120                                    |
| симулација 7-а    | 0:35:47              | 10,814               | 2,801                | 8,013                   | 25,899               | 1,125                                    |
| симулација 8-а    | 0:34:51              | 10,627               | 2,554                | 8,073                   | 24,030               | 1,134                                    |
| симулација 9-а    | 0:34:58              | 11,596               | 2,787                | 8,810                   | 24,031               | 1,237                                    |
| симулација 10-а   | 0:35:21              | 11,434               | 2,723                | 8,711                   | 23,818               | 1,223                                    |
| симулација 11-а   | 0:34:06              | 11,459               | 2,744                | 8,715                   | 23,945               | 1,224                                    |
| симулација 12-а   | 0:35:29              | 10,679               | 2,592                | 8,087                   | 24,270               | 1,136                                    |
| симулација 13-а   | 0:35:17              | 10,590               | 2,558                | 8,032                   | 24,157               | 1,128                                    |
| симулација 14-а   | 0:35:12              | 10,623               | 2,560                | 8,064                   | 24,094               | 1,132                                    |
| симулација 15-а   | 0:35:17              | 10,720               | 2,627                | 8,092                   | 24,509               | 1,136                                    |
| симулација 16-а   | 0:34:43              | 10,764               | 2,632                | 8,133                   | 24,448               | 1,142                                    |
| симулација 17-а   | 0:34:52              | 10,694               | 2,612                | 8,082                   | 24,423               | 1,135                                    |
| симулација 18-а   | 0:35:49              | 10,799               | 2,623                | 8,176                   | 24,290               | 1,148                                    |
| симулација 19-а   | 0:35:23              | 10,530               | 2,553                | 7,977                   | 24,248               | 1,120                                    |
| симулација 20-а   | 0:34:33              | 10,719               | 2,622                | 8,097                   | 24,464               | 1,137                                    |
| симулација 21-а   | 0:35:02              | 11,213               | 2,663                | 8,550                   | 23,750               | 1,201                                    |
| симулација 22-а   | 0:35:10              | 11,071               | 2,638                | 8,433                   | 23,828               | 1,184                                    |
| симулација 23-а   | 0:34:29              | 11,222               | 2,681                | 8,541                   | 23,887               | 1,199                                    |
| симулација 24-а   | 0:35:17              | 11,612               | 2,750                | 8,862                   | 23,681               | 1,245                                    |
| симулација 25-а   | 0:35:09              | 10,827               | 2,620                | 8,207                   | 24,199               | 1,152                                    |
| симулација 26-а   | 0:35:08              | 10,977               | 2,699                | 8,278                   | 24,590               | 1,162                                    |
| симулација 27-а   | 0:35:07              | 10,770               | 2,626                | 8,144                   | 24,379               | 1,144                                    |
| симулација 28-а   | 0:35:00              | 11,008               | 2,699                | 8,309                   | 24,522               | 1,167                                    |
| симулација 29-а   | 0:34:37              | 10,590               | 2,558                | 8,032                   | 24,156               | 1,128                                    |
| симулација 30-а   | 0:34:37              | 10,416               | 2,516                | 7,900                   | 24,153               | 1,109                                    |
| симулација 31-а   | 0:34:52              | 10,999               | 2,678                | 8,321                   | 24,350               | 1,168                                    |
| симулација 32-а   | 0:35:11              | 10,899               | 2,648                | 8,251                   | 24,299               | 1,159                                    |
| симулација 33-а   | 0:35:14              | 10,787               | 2,592                | 8,195                   | 24,031               | 1,151                                    |
| симулација 34-а   | 0:35:06              | 11,762               | 2,819                | 8,944                   | 23,964               | 1,256                                    |

<sup>1</sup>са урачунатим губитком у фази пуњења

Табела 10.27 Преглед средњих, минималних и максималних резултата симулације рада Е-буса Niger KLQ6125GEV3 на линији ЕКО 1, смер "А", поподневно вршно оптерећење, пролећно-јесењи период

| ЕКО 1<br>Смер "А" | $T_{pA}$<br>hh:mm:ss | $E_{p_{ucA}}$<br>kWh | $E_{r_{ucA}}$<br>kWh | $\Delta E_{ucA}$<br>kWh | $\lambda_{ucA}$<br>% | $E'_{ebus_{LA}}$<br>kWh·km <sup>-1</sup> |
|-------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|--|
| Средња вредност   | 0:35:03              | 10,931               | 2,667                | 8,264                   | 24,411               | 1,160                                    |
| Мин. вредност     | 0:34:06              | 10,416               | 2,516                | 7,886                   | 23,681               | 1,107                                    |
| Макс. вредност    | 0:35:59              | 11,762               | 2,830                | 8,944                   | 26,094               | 1,256                                    |

Укупно је симулирано 34 вожње у смеру "А". Просечна потрошња Е-буса износи 1,160 kWh·km<sup>-1</sup> са стандардним одступањем од 0,042 kWh·km<sup>-1</sup>. Симулирано просечно време превоза је 35 минута и 3 секунди (0:35:03), просечна вредност преузете електричне енергије из суперкондензатора је 10,931 kWh, просечна енергија враћене у суперкондензатор је 2,667 kWh и средњи остварени коефицијент ефикасности рекулације 24,41%. Минимална вредност потрошње електричне енергије Е-буса добијена симулацијом је 1,107 kWh·km<sup>-1</sup> а максимална вредност је 1,256 kWh·km<sup>-1</sup>. У односу на средњу вредност потрошње електричне



енергије процентуална одступања су у границама од 4,57% до 8,28%, док је процентуална разлика између максималне и минималне потрошње 13,46%. Добијене разлике у потрошње електричне енергије у симулацијама као непоновљивим случајним догађајима у потпуности репрезентују различите случајеве оптерећења Е-буса, убрзања и успорења који су присутни у реалној експлоатацији. Намеће се питање поређења добијених резултата симулације и емпиријским података који су представљени у Поглављу 6. У табели 6.13 (Поглавље 6, тачка 6.8.1) просечна потрошња Е-буса у поподневном вршном оптерећењу на узорку од 91 мерења износи  $1,209 \text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ , што је разлика од 4,05% у односу на средњу вредност потрошње Е-буса добијене симулацијом.

Анализирани узорак емпиријских резултата од 91 мерења је изразито нехомоген с обзиром да су времена превоза била у дијапазону од 27 до 45 минута и спољне температуре од  $12 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $22 \text{ }^\circ\text{C}$  [140]. Из наведеног емпиријског узорка, анализиран је издвојени узорак који је приказан у табели 10.28, где су издвојена мерења потрошње електричне енергије Е-буса Higer KLQ6125GEV3 у узорцима где је време превоза у смеру "А" било између 33 минута, 49 секунди (0:33:49) и 36 минута 18 секунди (0:36:18) што одговара временима која су добијена у симулацијама 1÷34.

Табела 10.28 Издвојени емпиријски узорак мерења потрошње електричне енергије Е-буса, на линији ЕКО 1, смер "А", поподневно вршно оптерећење, пролећно-јесењи период

| Датум         | Е-бус | $T_{\text{spo}}$<br>°C | Време<br>поласка<br>hh:mm:ss | Време<br>доласка<br>hh:mm:ss | $T_{\text{PA}}$<br>hh:mm:ss | $SOC_A$<br>% | $SOC_B$<br>% | $\Delta SOC$<br>% | $\Delta E_{\text{ucA}}$<br>kWh | $E'_{\text{ebusLA}}$<br>kWh·km <sup>-1</sup> |
|---------------|-------|------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------|--------------|-------------------|--------------------------------|--|
| 10.4.2018     | 2105  | 19                     | 13:53:54                     | 14:27:43                     | 0:33:49                     | 95,80        | 54,40        | 41,40             | 8,280                          | 1,164  |
| 19.10.2018    | 2101  | 16                     | 16:20:36                     | 16:54:36                     | 0:34:00                     | 92,50        | 49,00        | 43,50             | 8,700                          | 1,223  |
| 27.5.2019     | 2103  | 20                     | 13:31:18                     | 14:05:20                     | 0:34:02                     | 98,50        | 54,90        | 43,60             | 8,720                          | 1,226  |
| 30.5.2019     | 2102  | 22                     | 15:51:08                     | 16:25:18                     | 0:34:10                     | 94,30        | 56,60        | 37,70             | 7,540                          | 1,060  |
| 22.5.2019     | 2102  | 22                     | 14:17:08                     | 14:51:47                     | 0:34:39                     | 95,90        | 56,40        | 39,50             | 7,900                          | 1,110  |
| 24.5.2019     | 2103  | 16                     | 16:39:49                     | 17:14:40                     | 0:34:51                     | 87,90        | 49,60        | 38,30             | 7,660                          | 1,077  |
| 11.4.2018     | 2101  | 22                     | 13:03:29                     | 13:38:29                     | 0:35:00                     | 85,30        | 45,80        | 39,50             | 7,900                          | 1,110  |
| 30.5.2019     | 2105  | 21                     | 14:39:44                     | 15:14:47                     | 0:35:03                     | 99,50        | 53,50        | 46,00             | 9,200                          | 1,293  |
| 29.5.2019     | 2101  | 15                     | 14:45:09                     | 15:20:16                     | 0:35:07                     | 85,00        | 44,90        | 40,10             | 8,020                          | 1,127  |
| 27.5.2019     | 2103  | 20                     | 16:39:07                     | 17:14:39                     | 0:35:32                     | 95,60        | 59,30        | 36,30             | 7,260                          | 1,020  |
| 22.5.2019     | 2101  | 18                     | 15:34:09                     | 16:09:42                     | 0:35:33                     | 97,70        | 57,70        | 40,00             | 8,000                          | 1,124  |
| 27.5.2019     | 2101  | 20                     | 13:05:49                     | 13:41:28                     | 0:35:39                     | 95,20        | 51,00        | 44,20             | 8,840                          | 1,243  |
| 24.5.2019     | 2101  | 15                     | 14:39:55                     | 15:15:40                     | 0:35:45                     | 97,20        | 54,35        | 42,85             | 8,570                          | 1,205  |
| 6.10.2017     | 2105  | 19                     | 17:24:24                     | 18:00:12                     | 0:35:48                     | 93,55        | 53,70        | 39,85             | 7,970                          | 1,120  |
| 17.4.2018     | 2103  | 16                     | 15:04:26                     | 15:40:22                     | 0:35:56                     | 98,20        | 61,80        | 36,40             | 7,280                          | 1,023  |
| 29.5.2019     | 2101  | 14                     | 14:55:08                     | 15:31:26                     | 0:36:18                     | 88,20        | 43,40        | 44,80             | 8,960                          | 1,259  |
| <b>Просек</b> |       | <b>18</b>              |                              |                              | <b>0:35:04</b>              |              |              |                   | <b>8,175</b>                   | <b>1,149</b>                                 |

Просечна потрошња Е-буса Higer KLQ6125GEV3 на репрезентативном емпиријском узорку од 16 мерења је  $1,149 \text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$  и стандардним одступањем  $0,084 \text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ . Процентуална разлика средње вредности потрошње електричне енергије Е-буса из издвојеног емпиријског узорка и симулације износи 0,96%. Применом теста о једнакости средњих вредности потрошње електричне енергије Е-буса наведена два статистичка скупа ако је  $|t| < t_{0,05} = 1,96$ , сматраће се да је разлика средњих вредности занемарива (случајна). Резултат теста је  $|t| = 0,495 < 1,96$ , чиме се доказује део полазне *Хипотезе 5* да између емпиријских резултата потрошње електричне енергије Е-буса и симулираних резултата за послеподневно вршно оптерећење у смеру "А" нема битне разлике.



Резултати симулације рада Е-буса у смеру "Б" представљени су у табели 10.29.

Табела 10.29 Резултати симулације рада Е-буса Niger KLQ6125GEV3 на линији ЕКО 1, смер "Б", поподневно вршно оптерећење, пролећно-јесењи период

| ЕКО 1<br>Смер "Б" | $T_{PB}$<br>hh:mm:ss | $E_{p_{ucB}}$<br>kWh | $E_{r_{ucB}}$<br>kWh | $\Delta E_{ucB}$<br>kWh | $\lambda_{ucB}$<br>% | $E'_{ebusLB}$<br>kWh·km <sup>-1</sup> |
|-------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|---------------------------------------|
| симулација 1-б    | 0:37:29              | 14,567               | 2,120                | 12,448                  | 14,552               | 1,514                                 |
| симулација 2-б    | 0:38:05              | 15,101               | 2,508                | 12,592                  | 16,611               | 1,532                                 |
| симулација 3-б    | 0:38:35              | 15,054               | 2,504                | 12,551                  | 16,632               | 1,526                                 |
| симулација 4-б    | 0:37:29              | 15,269               | 2,562                | 12,707                  | 16,782               | 1,545                                 |
| симулација 5-б    | 0:37:34              | 15,193               | 2,526                | 12,668                  | 16,624               | 1,541                                 |
| симулација 6-б    | 0:37:32              | 15,368               | 2,584                | 12,784                  | 16,815               | 1,555                                 |
| симулација 7-б    | 0:37:56              | 15,166               | 2,532                | 12,634                  | 16,696               | 1,537                                 |
| симулација 8-б    | 0:36:52              | 15,103               | 2,549                | 12,554                  | 16,878               | 1,527                                 |
| симулација 9-б    | 0:38:05              | 15,382               | 2,555                | 12,828                  | 16,607               | 1,560                                 |
| симулација 10-б   | 0:37:04              | 15,024               | 2,522                | 12,502                  | 16,784               | 1,521                                 |
| симулација 11-б   | 0:36:53              | 15,332               | 2,562                | 12,770                  | 16,709               | 1,553                                 |
| симулација 12-б   | 0:37:57              | 15,381               | 2,569                | 12,812                  | 16,700               | 1,558                                 |
| симулација 13-б   | 0:38:38              | 16,465               | 2,539                | 13,926                  | 15,420               | 1,694                                 |
| симулација 14-б   | 0:37:34              | 16,550               | 2,565                | 13,985                  | 15,497               | 1,701                                 |
| симулација 15-б   | 0:37:32              | 16,509               | 2,554                | 13,955                  | 15,472               | 1,697                                 |
| симулација 16-б   | 0:38:09              | 16,472               | 2,563                | 13,909                  | 15,561               | 1,692                                 |
| симулација 17-б   | 0:37:30              | 15,148               | 2,327                | 12,822                  | 15,359               | 1,559                                 |
| симулација 18-б   | 0:37:23              | 14,989               | 2,299                | 12,689                  | 15,339               | 1,543                                 |
| симулација 19-б   | 0:37:36              | 15,067               | 2,322                | 12,745                  | 15,414               | 1,550                                 |
| симулација 20-б   | 0:37:50              | 15,380               | 2,389                | 12,991                  | 15,536               | 1,580                                 |
| симулација 21-б   | 0:38:09              | 14,906               | 2,243                | 12,663                  | 15,047               | 1,540                                 |
| симулација 22-б   | 0:38:06              | 15,030               | 2,279                | 12,751                  | 15,164               | 1,551                                 |
| симулација 23-б   | 0:38:36              | 15,098               | 2,297                | 12,801                  | 15,212               | 1,557                                 |
| симулација 24-б   | 0:37:41              | 14,843               | 2,199                | 12,644                  | 14,814               | 1,538                                 |
| симулација 25-б   | 0:38:42              | 14,962               | 2,235                | 12,728                  | 14,936               | 1,548                                 |
| симулација 26-б   | 0:37:32              | 14,902               | 2,250                | 12,651                  | 15,102               | 1,539                                 |
| симулација 27-б   | 0:37:13              | 14,811               | 2,255                | 12,556                  | 15,225               | 1,527                                 |
| симулација 28-б   | 0:38:17              | 15,055               | 2,295                | 12,760                  | 15,244               | 1,552                                 |
| симулација 29-б   | 0:37:44              | 15,088               | 2,277                | 12,812                  | 15,089               | 1,558                                 |
| симулација 30-б   | 0:38:33              | 15,268               | 2,529                | 12,740                  | 16,561               | 1,549                                 |
| симулација 31-б   | 0:38:10              | 15,296               | 2,593                | 12,702                  | 16,955               | 1,545                                 |
| симулација 32-б   | 0:36:02              | 15,085               | 2,479                | 12,606                  | 16,430               | 1,533                                 |
| симулација 33-б   | 0:37:05              | 15,093               | 2,527                | 12,566                  | 16,741               | 1,528                                 |
| симулација 34-б   | 0:36:38              | 15,129               | 2,537                | 12,592                  | 16,770               | 1,532                                 |

Табела 10.30 Приказ средњих, минималних и максималних резултата симулације Е-буса на линији ЕКО 1, смер "Б", поподневно вршно оптерећење, пролећно-јесењи период

| ЕКО 1<br>Смер "Б" | $T_{PB}$<br>hh:mm:ss | $E_{p_{ucB}}$<br>kWh | $E_{r_{ucB}}$<br>kWh | $\Delta E_{ucB}$<br>kWh | $\lambda_{ucB}$<br>% | $E'_{ebusLB}$<br>kWh·km <sup>-1</sup> |
|-------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|---------------------------------------|
| Средња вредност   | 0:37:43              | 15,267               | 2,431                | 12,837                  | 15,920               | 1,561                                 |
| Мин. вредност     | 0:36:02              | 14,567               | 2,120                | 12,447                  | 14,553               | 1,514                                 |
| Макс. вредност    | 0:38:42              | 16,550               | 2,593                | 14,453                  | 16,955               | 1,701                                 |

У смеру "Б" је симулиран је исти број 34 возње као у смеру "А". Просечна потрошња Е-буса износи 1,561 kWh·km<sup>-1</sup> са стандардним одступањем од 0,052 kWh·km<sup>-1</sup>. Симулирано просечно време превоза је 37 минута и 43 секунди (0:37:43), просечна преузета електрична енергија из суперкондензатора је 15,267 kWh, просечна енергија враћена у суперкондензатор 2,431 kWh и остварени коефицијент ефикасности рекулације 15,92%. Процентуална одступања потрошње електричне енергије Е-буса појединачних симулација од просечне потрошње Е-буса су у границама од 3,01% до 8,97%. Процентуално одступање

између минималне и максималне вредности потрошње електричне енергије Е-буса је 12,35%. У табели 6.16 просечна потрошња Е-буса у поподневном вршном оптерећењу на узорку од 86 мерења износи  $1,523 \text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ , што је разлика од 2,49% у односу на средњу вредност потрошње Е-буса добијене симулацијом. Анализирани узорак емпиријских резултата од 86 мерења је изразито нехомоген с обзиром да су времена војњи у дијапазону од 27 до 52 минута и спољне температуре од  $12^\circ\text{C}$  до  $22^\circ\text{C}$  [140]. Из наведеног емпиријског узорка анализиран је издвојен узорак који је приказан у табели 10.31.

Табела 10.31 Издвојени емпиријски узорак мерења потрошње електричне енергије Е-буса, на линији ЕКО 1, смер "Б", поподневно вршно оптерећење, пролећно-јесењи период

| Датум         | Е-бус | $T_{\text{spo}}^\circ\text{C}$ | Време поласка<br>hh:mm:ss | Време доласка<br>hh:mm:ss | $T_{\text{PB}}$<br>hh:mm:ss | $\text{SOC}_B$<br>% | $\text{SOC}_A$<br>% | $\Delta\text{SOC}$<br>% | $\Delta E_{\text{uc}_B}$<br>kWh | $E'_{\text{ebus}_{LB}}$<br>kWh·km <sup>-1</sup> |
|---------------|-------|--------------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|---------------------------------|---|
| 11.4.2018     | 2103  | 21,9                           | 15:52:10                  | 16:28:18                  | 0:36:08                     | 97,40               | 34,60               | 62,80                   | 12,56                           | 1,552   |
| 18.4.2018     | 2103  | 19,1                           | 15:52:18                  | 16:28:31                  | 0:36:13                     | 100,40              | 43,60               | 56,80                   | 11,36                           | 1,403   |
| 24.5.2019     | 2102  | 19,0                           | 16:37:10                  | 17:13:26                  | 0:36:16                     | 99,30               | 32,60               | 66,70                   | 13,34                           | 1,648   |
| 17.4.2018     | 2104  | 18,8                           | 14:41:17                  | 15:17:34                  | 0:36:17                     | 99,40               | 41,90               | 57,50                   | 11,50                           | 1,421   |
| 16.4.2018     | 2101  | 16,4                           | 15:27:49                  | 16:04:12                  | 0:36:23                     | 99,70               | 31,50               | 68,20                   | 13,64                           | 1,685   |
| 27.5.2019     | 2103  | 18,5                           | 15:51:55                  | 16:28:21                  | 0:36:26                     | 96,70               | 33,70               | 63,00                   | 12,60                           | 1,556   |
| 18.4.2018     | 2104  | 17,4                           | 17:48:18                  | 18:24:47                  | 0:36:29                     | 99,60               | 35,80               | 63,80                   | 12,76                           | 1,576   |
| 22.5.2019     | 2105  | 12,9                           | 17:26:47                  | 18:03:16                  | 0:36:29                     | 83,10               | 30,70               | 52,40                   | 10,48                           | 1,295   |
| 27.5.2019     | 2105  | 15,2                           | 13:05:47                  | 13:42:20                  | 0:36:33                     | 98,70               | 43,90               | 54,80                   | 10,96                           | 1,354   |
| 27.5.2019     | 2105  | 22,1                           | 16:13:35                  | 16:50:26                  | 0:36:51                     | 98,50               | 30,90               | 67,60                   | 13,52                           | 1,670   |
| 30.5.2019     | 2105  | 16,7                           | 13:05:26                  | 13:42:37                  | 0:37:11                     | 98,50               | 38,90               | 59,60                   | 11,92                           | 1,472   |
| 11.4.2018     | 2101  | 22,2                           | 15:27:33                  | 16:04:45                  | 0:37:12                     | 99,40               | 37,00               | 62,40                   | 12,48                           | 1,542   |
| 30.5.2019     | 2103  | 20,4                           | 14:18:16                  | 14:55:32                  | 0:37:16                     | 98,40               | 39,80               | 58,60                   | 11,72                           | 1,448   |
| 27.5.2019     | 2102  | 20,9                           | 13:29:38                  | 14:07:13                  | 0:37:35                     | 96,20               | 40,00               | 56,20                   | 11,24                           | 1,388   |
| 24.5.2019     | 2102  | 17,8                           | 13:29:06                  | 14:06:45                  | 0:37:39                     | 98,50               | 36,30               | 62,20                   | 12,44                           | 1,537   |
| 17.4.2018     | 2101  | 17,6                           | 17:02:10                  | 17:39:49                  | 0:37:39                     | 99,20               | 37,20               | 62,00                   | 12,40                           | 1,532   |
| 17.4.2018     | 2101  | 18,2                           | 15:27:40                  | 16:05:24                  | 0:37:44                     | 99,30               | 37,80               | 61,50                   | 12,30                           | 1,519   |
| 24.5.2019     | 2103  | 17,7                           | 17:25:33                  | 18:03:33                  | 0:38:00                     | 99,30               | 41,50               | 57,80                   | 11,56                           | 1,428   |
| 23.5.2019     | 2102  | 20,7                           | 16:41:41                  | 17:19:50                  | 0:38:09                     | 99,80               | 33,80               | 66,00                   | 13,20                           | 1,631   |
| 16.4.2018     | 2101  | 15,6                           | 13:53:21                  | 14:31:39                  | 0:38:18                     | 99,50               | 31,70               | 67,80                   | 13,56                           | 1,675   |
| 27.5.2019     | 2102  | 21,9                           | 16:39:39                  | 17:18:23                  | 0:38:44                     | 94,60               | 25,90               | 68,70                   | 13,74                           | 1,697   |
| 27.5.2019     | 2105  | 15,9                           | 14:39:44                  | 15:18:35                  | 0:38:51                     | 99,30               | 40,50               | 58,80                   | 11,76                           | 1,453   |
| <b>Просек</b> |       | <b>18,5</b>                    |                           |                           | <b>0:37:12</b>              |                     |                     |                         | <b>12,320</b>                   | <b>1,522</b>                                    |

Издвојена мерења потрошње електричне енергије Е-буса Niger KLQ6125GEV3 у узорцима где је време превоза у смеру "Б" било између 36 минута, 08 секунди (0:36:08) и 38 минута 51 секунди (0:38:51) што одговара временима која су добијена у симулацијама 1-б÷34-б. Просечна потрошња Е-буса Niger KLQ6125GEV3 на репрезентативном издвојеном емпиријском узорку од 22 мерења је  $1,522 \text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$  и стандардним одступањем  $0,115 \text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ , Процентуална разлика средње вредности потрошње електричне енергије Е-буса из издвојеног емпиријског узорка и симулације износи 2,56%. Применом теста о једнакости средњих вредности потрошње електричне енергије Е-буса наведена два статистичка скупа ако је  $|t| < t_{0,05} = 1,96$ , сматраће се да је разлика средњих вредности занемарива (случајна).

Резултат теста је  $|t| = 1,494 < 1,96$  чиме се доказује део полазне *Хипотезе 5* да између емпиријских резултата потрошње електричне енергије Е-буса и симулираних резултата за послеподневно вршно оптерећење у смеру "Б", нема битне разлике.

### 10.8 Резултати симулација рада Е-буса Niger KLQ6125GEV3 на линији бр. 29 (Дорћол-Медаковић III)

Симулација рада Е-буса Niger KLQ6125GEV3 на линији бр. 29 (Дорћол-Медаковић III) има за циљ упоређивање експерименталних резултата мерења потрошње електричне енергије Е-буса који су обављени 09.03.2017. године (Поглавље 7, тачка 7.2) и резултата симулације. Мерење које је обављено 09.03.2017. године рађено је са неоптерећеним возилом у коме је било 6 путника и са константно оптерећеним возилом са 45 путника. У симулационом моделу улазни елементи који се односе на времена вожње између станица и времена стајања на станицама добијени су непосредним мерењем током теста од 09.03.2017. године, како је приказано у табелама 10.32 и 10.33.

Табела 10.32 Елементи моделирања за линију бр. 29, смер "А"

| Смер "А", станице | Време стајања на станици<br>s | Време вожње<br>s | Број путника у возилу | Број семафорисаних раскрсница | Очекивани број основних возних циклуса | Дужина основног возног циклуса<br>$S_{Sub}+S_{const}+S_{коџ}$<br>m |
|-------------------|-------------------------------|------------------|-----------------------|-------------------------------|--|--|
| Дорћол (ГСП)      | 0                             |                  |                       |                               |  |  |
| Дунавска          | 8                             | 118              | 6 (45)                | 1                             | 2                                      | 277,5  |
| Душанова          | 12                            | 83               | 6 (45)                | 2                             | 2                                      | 182,5  |
| Трг републике     | 19                            | 131              | 6 (45)                | 3                             | 3                                      | 200,0  |
| Теразије          | 21                            | 110              | 6 (45)                | 2                             | 2                                      | 199,0  |
| Београђанка       | 20                            | 176              | 6 (45)                | 3                             | 3                                      | 214,0  |
| Трг Славија       | 22                            | 149              | 6 (45)                | 3                             | 3                                      | 188,0  |
| Катанићева        | 14                            | 159              | 6 (45)                | 2                             | 3                                      | 223,3  |
| Мачванска         | 12                            | 75               | 6 (45)                | 1                             | 2                                      | 133,0  |
| Војводе Драгомира | 11                            | 92               | 6 (45)                | 2                             | 2                                      | 203,5  |
| Црвени крст       | 16                            | 137              | 6 (45)                | 2                             | 3                                      | 229,0  |
| Брегалничка       | 14                            | 79               | 6 (45)                | 1                             | 2                                      | 187,5  |
| В. Тодоровића     | 13                            | 88               | 6 (45)                | 1                             | 2                                      | 195,5  |
| Школа В. Илића    | 16                            | 80               | 6 (45)                | 2                             | 2                                      | 151,5  |
| Римска            | 11                            | 111              | 6 (45)                | 1                             | 2                                      | 270,0  |
| Шумице            | 14                            | 97               | 6 (45)                | 2                             | 2                                      | 228,0  |
| Медаковић II      | 10                            | 135              | 6 (45)                | 3                             | 2                                      | 462,0  |
| Кружни пут        | 9                             | 124              | 6 (45)                | 1                             | 2                                      | 185,0  |
| Медаковић III     | 8                             | 120              | 6 (45)                | 2                             | 3                                      | 186,3  |

Табела 10.33 Елементи моделирања за линију бр. 29, смер "Б"

| Смер "Б", станице | Време стајања на станици<br>s | Време вожње<br>s | Број путника у возилу | Број семафорисаних раскрсница | Очекивани број основних возних циклуса | Дужина основног возног циклуса<br>$S_{Sub}+S_{const}+S_{коџ}$<br>m |
|-------------------|-------------------------------|------------------|-----------------------|-------------------------------|--|--|
| Медаковић III     | 0                             |                  |                       |                               |  |  |
| Кружни пут        | 10                            | 86               | 6 (45)                | 2                             | 2                                      | 203,5  |
| Медаковић II      | 12                            | 125              | 6 (45)                | 2                             | 2                                      | 317,5  |
| В.Томановића      | 11                            | 128              | 6 (45)                | 2                             | 2                                      | 360,0  |
| Шумице            | 15                            | 66               | 6 (45)                | 1                             | 2                                      | 126,0  |
| Римска            | 10                            | 67               | 6 (45)                | 1                             | 2                                      | 111,5  |
| Школа В. Илића    | 18                            | 154              | 6 (45)                | 2                             | 2                                      | 347,5  |
| В.Тодоровића      | 14                            | 84               | 6 (45)                | 2                             | 2                                      | 159,0  |
| Брегалничка       | 14                            | 77               | 6 (45)                | 1                             | 2                                      | 165,0  |
| Црвени крст       | 18                            | 111              | 6 (45)                | 2                             | 2                                      | 250,5  |
| Војводе Драгомира | 15                            | 94               | 6 (45)                | 1                             | 2                                      | 213,5  |
| Новопазарска      | 14                            | 127              | 6 (45)                | 2                             | 2                                      | 268,5  |
| Катанићева        | 14                            | 79               | 6 (45)                | 1                             | 2                                      | 157,5  |
| Трг Славија       | 15                            | 173              | 6 (45)                | 2                             | 2                                      | 292,0  |
| Београђанка       | 16                            | 135              | 6 (45)                | 3                             | 3                                      | 152,6  |
| Теразије          | 16                            | 230              | 6 (45)                | 3                             | 3                                      | 236,0  |
| Трг републике     | 19                            | 109              | 6 (45)                | 2                             | 2                                      | 185,0  |
| Душанова          | 10                            | 121              | 6 (45)                | 2                             | 2                                      | 222,0  |
| Дунавска          | 9                             | 106              | 6 (45)                | 2                             | 2                                      | 198,5  |
| Дорћол (ГСП)      | 7                             | 147              | 6 (45)                | 1                             | 2                                      | 300,0  |

У табели 10.34 приказани су резултати симулација рада Е-буса Higer KLQ6125GEV3 на линији бр. 29 (Дорћол-Медаковић III) за смер "А" у случају да је у возилу 6 путника.

Табела 10.34 Резултати симулације рада Е-буса Higer KLQ6125GEV3 на линији бр.29, смер "А", неоптерећено возило (6 путника)

| Линија бр.29<br>Смер "А"<br>(6 путника) | $T_{pA}$<br>hh:mm:ss | $E_{pusA}$<br>kWh | $E_{r_{ucA}}$<br>kWh | $\Delta E_{ucA}$<br>kWh | $\lambda_{ucA}$<br>% | $E'_{ebus_{LA}}$<br>kWh·km <sup>-1</sup> |
|---|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|--|
| симулација 1-а                          | 0:38:33              | 15,145            | 2,325                | 12,820                  | 15,352               | 1,484                                    |
| симулација 2-а                          | 0:39:21              | 15,066            | 2,328                | 12,738                  | 15,452               | 1,474                                    |
| симулација 3-а                          | 0:38:15              | 14,962            | 2,290                | 12,672                  | 15,304               | 1,467                                    |
| симулација 4-а                          | 0:39:04              | 15,106            | 2,306                | 12,800                  | 15,264               | 1,481                                    |
| симулација 5-а                          | 0:39:33              | 15,030            | 2,282                | 12,748                  | 15,180               | 1,475                                    |
| симулација 6-а                          | 0:39:24              | 15,112            | 2,350                | 12,762                  | 15,550               | 1,477                                    |
| симулација 7-а                          | 0:38:46              | 15,020            | 2,298                | 12,722                  | 15,299               | 1,472                                    |
| симулација 8-а                          | 0:37:56              | 14,649            | 2,026                | 12,623                  | 13,831               | 1,461                                    |
| симулација 9-а                          | 0:39:01              | 14,981            | 2,310                | 12,670                  | 15,423               | 1,466                                    |
| симулација 10-а                         | 0:39:30              | 14,918            | 2,059                | 12,859                  | 13,800               | 1,488                                    |
| симулација 11-а                         | 0:38:49              | 14,997            | 2,091                | 12,906                  | 13,942               | 1,494                                    |
| симулација 12-а                         | 0:39:08              | 14,914            | 2,088                | 12,826                  | 13,999               | 1,484                                    |
| симулација 13-а                         | 0:39:20              | 15,655            | 2,310                | 13,345                  | 14,756               | 1,545                                    |
| симулација 14-а                         | 0:39:29              | 14,924            | 2,053                | 12,871                  | 13,756               | 1,490                                    |
| симулација 15-а                         | 0:39:46              | 14,931            | 2,067                | 12,864                  | 13,843               | 1,489                                    |
| симулација 16-а                         | 0:38:20              | 14,931            | 2,043                | 12,888                  | 13,684               | 1,492                                    |
| симулација 17-а                         | 0:38:43              | 15,027            | 2,303                | 12,723                  | 15,327               | 1,473                                    |
| симулација 18-а                         | 0:38:49              | 14,927            | 2,086                | 12,841                  | 13,975               | 1,486                                    |
| симулација 19-а                         | 0:38:51              | 14,973            | 2,141                | 12,832                  | 14,302               | 1,485                                    |
| симулација 20-а                         | 0:38:34              | 15,068            | 2,355                | 12,713                  | 15,632               | 1,471                                    |

Табела 10.35 Преглед средњих, минималних и максималних резултата симулације рада Е-буса Higer KLQ6125GEV3 на линији бр.29, смер "А", неоптерећено возило (6 путника)

| Линија бр.29<br>Смер "А"<br>(6 путника) | $T_{pA}$<br>hh:mm:ss | $E_{pusA}$<br>kWh | $E_{r_{ucA}}$<br>kWh | $\Delta E_{ucA}$<br>kWh | $\lambda_{ucA}$<br>% | $E'_{ebus_{LA}}$<br>kWh·km <sup>-1</sup> |
|---|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|--|
| Средња вредност                         | 0:38:57              | 15,017            | 2,206                | 12,811                  | 14,684               | 1,483                                    |
| Мин. вредност                           | 0:37:56              | 14,649            | 2,026                | 12,623                  | 13,684               | 1,461                                    |
| Макс. вредност                          | 0:39:46              | 15,655            | 2,355                | 13,345                  | 15,632               | 1,545                                    |

Просечна вредност потрошње електричне енергије Е-буса добијена симулацијом 20 вожњи у смеру "А" у случају неоптерећеног возила износи 1,483 kWh·km<sup>-1</sup>. Према резултатима мерења потрошње електричне енергије Е-буса од 09.03.2017. године, што је приказано у Поглављу 7, тачка 7.2, табела 7.4, потрошња Е-буса износила је 1,520 kWh·km<sup>-1</sup>. Процентуална разлика између резултата симулације и измерених вредности је 2,49%, што доказује део полазне Хипотезе 5.

У табели 10.36 приказани су резултати симулација рада Е-буса Higer KLQ6125GEV3 на линији бр.29 (Дорћол-Медаковић III) за смер "Б" у случају да је у возилу 6 путника.

Табела 10.36 Резултати симулације рада Е-буса Higer KLQ6125GEV3 на линији бр. 29, смер "Б", неоптерећено возило (6 путника)

| Линија бр.29<br>Смер "Б"<br>(6 путника) | $T_{pB}$<br>hh:mm:ss | $E_{pucB}$<br>kWh | $E_{rucB}$<br>kWh | $\Delta E_{ucB}$<br>kWh | $\lambda_{ucB}$<br>% | $E'_{ebusLB}$<br>kWh·km <sup>-1</sup> |
|---|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------------|----------------------|---------------------------------------|
| симулација 1-6                          | 0:37:18              | 11,580            | 3,828             | 7,752                   | 33,05                | 0,912                                 |
| симулација 2-6                          | 0:38:00              | 11,866            | 3,926             | 7,940                   | 33,087               | 0,935                                 |
| симулација 3-6                          | 0:37:36              | 11,740            | 3,894             | 7,846                   | 33,169               | 0,923                                 |
| симулација 4-6                          | 0:36:55              | 11,962            | 3,972             | 7,990                   | 33,208               | 0,940                                 |
| симулација 5-6                          | 0:38:38              | 12,037            | 3,963             | 8,074                   | 32,922               | 0,950                                 |
| симулација 6-6                          | 0:38:06              | 11,705            | 3,611             | 8,094                   | 30,852               | 0,953                                 |
| симулација 7-6                          | 0:37:42              | 11,651            | 3,869             | 7,782                   | 33,204               | 0,916                                 |
| симулација 8-6                          | 0:37:44              | 11,816            | 3,901             | 7,916                   | 33,011               | 0,932                                 |
| симулација 9-6                          | 0:37:09              | 11,744            | 3,911             | 7,833                   | 33,305               | 0,922                                 |
| симулација 10-6                         | 0:37:41              | 11,943            | 3,938             | 8,005                   | 32,976               | 0,942                                 |
| симулација 11-6                         | 0:38:15              | 11,960            | 3,907             | 8,053                   | 32,670               | 0,948                                 |
| симулација 12-6                         | 0:37:22              | 11,700            | 3,571             | 8,129                   | 30,521               | 0,957                                 |
| симулација 13-6                         | 0:37:33              | 11,547            | 3,533             | 8,014                   | 30,598               | 0,943                                 |
| симулација 14-6                         | 0:37:55              | 11,707            | 3,619             | 8,087                   | 30,916               | 0,952                                 |
| симулација 15-6                         | 0:37:21              | 11,563            | 3,571             | 7,992                   | 30,885               | 0,941                                 |
| симулација 16-6                         | 0:38:16              | 11,698            | 3,628             | 8,070                   | 31,012               | 0,950                                 |
| симулација 17-6                         | 0:37:34              | 11,709            | 3,616             | 8,093                   | 30,882               | 0,953                                 |
| симулација 18-6                         | 0:37:54              | 11,630            | 3,587             | 8,043                   | 30,842               | 0,947                                 |
| симулација 19-6                         | 0:38:39              | 11,929            | 3,950             | 7,979                   | 33,113               | 0,939                                 |
| симулација 20-6                         | 0:38:18              | 11,773            | 3,613             | 8,161                   | 30,685               | 0,960                                 |

Табела 10.37 Преглед средњих, минималних и максималних резултата симулације рада Е-буса Higer KLQ6125GEV3 на линији бр. 29, смер "Б", неоптерећено возило (6 путника)

| Линија бр.29<br>Смер "Б"<br>(6 путника) | $T_{pB}$<br>hh:mm:ss | $E_{pucB}$<br>kWh | $E_{rucB}$<br>kWh | $\Delta E_{ucB}$<br>kWh | $\lambda_{ucB}$<br>% | $E'_{ebusLB}$<br>kWh·km <sup>-1</sup> |
|---|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------------|----------------------|---------------------------------------|
| Средња вредност                         | 0:37:48              | 11,763            | 3,388             | 7,993                   | 32,045               | 0,941                                 |
| Мин. вредност                           | 0:36:55              | 11,547            | 3,972             | 7,752                   | 30,521               | 0,912                                 |
| Макс. вредност                          | 0:38:39              | 12,037            | 3,828             | 8,161                   | 33,305               | 0,960                                 |

У смеру "Б" на основу ураћених 20 симулација, просечна вредност потрошње електричне енергије Е-буса износи 0,941 kWh·km<sup>-1</sup>. Према резултати емпиријског мерења од 09.03.2017. године, табела 7.4, потрошња електричне енергије износи 0,932 kWh·km<sup>-1</sup>, што је процентуална разлика од 0,96%. У смеру "Б" с обзиром да је траса линије већим делом у паду Е-бус има значајно мању потрошњу електричне енергије изражену у kWh·km<sup>-1</sup>, као последицу високог коефицијента ефикасности рекуперације  $\lambda_{uc}$ .

Према резултатима мерења од 09.03.2017. године у смеру "Б" у случају неоптерећеног возила са 6 путника, вредност  $\lambda_{uc}$  износи 33,7%. Просечна вредност  $\lambda_{uc}$  добијена симулацијама је 32,04%, односно вредност  $\lambda_{uc}$  је у распону од 30,52% до 33,30%.

У случају константног оптерећења Е-буса са 45 путника резултати симулација рада Е-буса Higer KLQ6125GEV3 на линији бр.29 (Дорћол-Медаковић III) за смер "А" приказани су у табели 10.38.

Табела 10.38 Резултати симулације рада Е-буса Higer KLQ6125GEV3 на линији бр.29, смер "А", оптерећено возило (45 путника)

| Линија бр.29<br>Смер "А"<br>(45 путника) | $T_{pA}$<br>hh:mm:ss | $E_{pucA}$<br>kWh | $E_{rucA}$<br>kWh | $\Delta E_{ucA}$<br>kWh | $\lambda_{ucA}$<br>% | $E'_{ebusLA}$<br>kWh·km <sup>-1</sup> |
|--|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------------|----------------------|---------------------------------------|
| симулација 1-а                           | 0:38:10              | 17,862            | 2,768             | 15,094                  | 15,498               | 1,747                                 |
| симулација 2-а                           | 0:38:42              | 17,949            | 2,764             | 15,185                  | 15,400               | 1,758                                 |
| симулација 3-а                           | 0:38:05              | 17,862            | 2,801             | 15,062                  | 15,680               | 1,743                                 |
| симулација 4-а                           | 0:38:47              | 18,070            | 2,838             | 15,232                  | 15,704               | 1,763                                 |
| симулација 5-а                           | 0:38:34              | 17,886            | 2,766             | 15,120                  | 15,463               | 1,750                                 |
| симулација 6-а                           | 0:38:41              | 17,839            | 2,756             | 15,083                  | 15,449               | 1,746                                 |
| симулација 7-а                           | 0:38:27              | 17,967            | 2,795             | 15,172                  | 15,555               | 1,756                                 |
| симулација 8-а                           | 0:38:58              | 17,951            | 2,809             | 15,142                  | 15,647               | 1,753                                 |
| симулација 9-а                           | 0:39:02              | 17,878            | 2,745             | 15,133                  | 15,353               | 1,752                                 |
| симулација 10-а                          | 0:39:30              | 17,860            | 2,758             | 15,102                  | 15,445               | 1,748                                 |
| симулација 11-а                          | 0:39:04              | 18,043            | 2,796             | 15,247                  | 15,498               | 1,765                                 |
| симулација 12-а                          | 0:38:38              | 17,924            | 2,817             | 15,107                  | 15,715               | 1,749                                 |
| симулација 13-а                          | 0:38:39              | 17,947            | 2,795             | 15,153                  | 15,571               | 1,754                                 |
| симулација 14-а                          | 0:38:26              | 17,867            | 2,801             | 15,066                  | 15,677               | 1,744                                 |
| симулација 15-а                          | 0:39:03              | 17,625            | 2,497             | 15,129                  | 14,165               | 1,751                                 |
| симулација 16-а                          | 0:39:02              | 17,652            | 2,478             | 15,174                  | 14,037               | 1,756                                 |
| симулација 17-а                          | 0:38:26              | 17,781            | 2,744             | 15,036                  | 15,435               | 1,740                                 |
| симулација 18-а                          | 0:39:29              | 18,005            | 2,605             | 15,400                  | 14,468               | 1,782                                 |
| симулација 19-а                          | 0:38:43              | 17,820            | 2,802             | 15,017                  | 15,726               | 1,738                                 |
| симулација 20-а                          | 0:38:36              | 17,540            | 2,460             | 15,080                  | 14,025               | 1,745                                 |

Табела 10.39 Преглед средњих, минималних и максималних резултата симулације рада Е-буса Higer KLQ6125GEV3 на линији бр. 29, смер "А", оптерећено возило (45 путника)

| Линија бр.29<br>Смер "А"<br>(45 путника) | $T_{pA}$<br>hh:mm:ss | $E_{pucA}$<br>kWh | $E_{rucA}$<br>kWh | $\Delta E_{ucA}$<br>kWh | $\lambda_{ucA}$<br>% | $E'_{ebusLA}$<br>kWh·km <sup>-1</sup> |
|--|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------------|----------------------|---------------------------------------|
| Средња вредност                          | 0:38:45              | 17,866            | 2,730             | 15,137                  | 15,276               | 1,752                                 |
| Мин. вредност                            | 0:38:05              | 17,540            | 2,838             | 15,017                  | 14,025               | 1,738                                 |
| Макс. вредност                           | 0:39:30              | 18,070            | 2,460             | 15,400                  | 15,726               | 1,782                                 |

У случају оптерећеног возила са 45 путника просечна потрошња електричне енергије Е-буса добијена симулацијама је 1,752 kWh·km<sup>-1</sup>. Мерењем од 09.03.2017. године, добијена је потрошња Е-буса 1,700 kWh·km<sup>-1</sup>, што даје процентуалну разлику од 3,05 % између резултата симулације и емпиријског мерења, чиме је доказан део полазне *Хипотезе 5*.

Резултати симулације рада Е-буса са оптерећењем од 45 путника у смеру "Б" приказани су у табели 10.40.



Табела 10.40 Резултати симулације рада Е-буса Higer KLQ6125GEV3 на линији бр.29, смер "Б", оптерећено возило (45 путника)

| Линија бр.29<br>Смер "Б"<br>(45 путника) | $T_{pB}$<br>hh:mm:ss | $E_{pucB}$<br>kWh | $E_{rucB}$<br>kWh | $\Delta E_{ucB}$<br>kWh | $\lambda_{ucB}$<br>% | $E'_{ebusLB}$<br>kWh·km <sup>-1</sup> |
|--|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------------|----------------------|---------------------------------------|
| симулација 1-б                           | 0:38:52              | 14,141            | 4,725             | 9,416                   | 33,416               | 1,108                                 |
| симулација 2-б                           | 0:38:42              | 14,274            | 4,701             | 9,573                   | 32,935               | 1,127                                 |
| симулација 3-б                           | 0:39:07              | 14,293            | 4,711             | 9,582                   | 32,963               | 1,128                                 |
| симулација 4-б                           | 0:38:41              | 14,363            | 4,762             | 9,601                   | 33,153               | 1,130                                 |
| симулација 5-б                           | 0:38:49              | 14,231            | 4,717             | 9,514                   | 33,148               | 1,120                                 |
| симулација 6-б                           | 0:39:04              | 13,496            | 4,164             | 9,332                   | 30,855               | 1,098                                 |
| симулација 7-б                           | 0:38:34              | 14,189            | 4,703             | 9,486                   | 33,144               | 1,116                                 |
| симулација 8-б                           | 0:39:25              | 14,367            | 4,757             | 9,610                   | 33,112               | 1,131                                 |
| симулација 9-б                           | 0:37:56              | 14,268            | 4,761             | 9,506                   | 33,373               | 1,119                                 |
| симулација 10-б                          | 0:38:57              | 14,389            | 4,756             | 9,633                   | 33,055               | 1,134                                 |
| симулација 11-б                          | 0:37:51              | 14,227            | 4,732             | 9,495                   | 33,261               | 1,118                                 |
| симулација 12-б                          | 0:38:25              | 14,071            | 4,617             | 9,454                   | 32,814               | 1,113                                 |
| симулација 13-б                          | 0:38:19              | 13,830            | 4,258             | 9,572                   | 30,790               | 1,127                                 |
| симулација 14-б                          | 0:38:44              | 13,949            | 4,626             | 9,323                   | 33,161               | 1,097                                 |
| симулација 15-б                          | 0:39:06              | 13,725            | 4,259             | 9,466                   | 31,030               | 1,114                                 |
| симулација 16-б                          | 0:38:30              | 13,858            | 4,275             | 9,582                   | 30,851               | 1,128                                 |
| симулација 17-б                          | 0:37:55              | 14,107            | 4,721             | 9,386                   | 33,467               | 1,105                                 |
| симулација 18-б                          | 0:37:54              | 14,139            | 4,698             | 9,442                   | 33,224               | 1,111                                 |
| симулација 19-б                          | 0:38:38              | 14,266            | 4,729             | 9,537                   | 33,150               | 1,123                                 |
| симулација 20-б                          | 0:38:26              | 14,063            | 4,655             | 9,408                   | 33,101               | 1,107                                 |

Табела 10.41 Преглед средњих, минималних и максималних резултата симулације рада Е-буса Higer KLQ6125GEV3 на линији бр. 29, смер "Б", оптерећено возило (45 путника)

| Линија бр.29<br>Смер "Б"<br>(45 путника) | $T_{pB}$<br>hh:mm:ss | $E_{pucB}$<br>kWh | $E_{rucB}$<br>kWh | $\Delta E_{ucB}$<br>kWh | $\lambda_{ucB}$<br>% | $E'_{ebusLB}$<br>kWh·km <sup>-1</sup> |
|--|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------------|----------------------|---------------------------------------|
| Средња вредност                          | 0:38:36              | 14,112            | 4,616             | 9,496                   | 32,700               | 1,118                                 |
| Мин. вредност                            | 0:37:51              | 13,496            | 4,762             | 9,323                   | 30,790               | 1,097                                 |
| Макс. вредност                           | 0:39:25              | 14,389            | 4,164             | 9,633                   | 33,467               | 1,134                                 |

На основу урађених симулација за оптерећено возило са 45 путника у смеру "Б" просечна потрошња електричне енергије Е-буса износи 1,118 kWh·km<sup>-1</sup>. Треба напоменути да током мерења потрошње електричне енергије Е-буса на линији бр.29 од 09.03.2017. године није рађено мерење потрошње електричне енергије Е-буса у смеру "Б" са оптерећеним возилом због техничких и организационих разлога, тако да добијени резултати симулацијом не могу да се упореде са емпиријским резултатима. У поређењу са резултатима симулације потрошње електричне енергије Е-буса у смеру "Б" када је возило неоптерећено (6 путника) где је потрошња 0,941 kWh·km<sup>-1</sup>, произилази да је у случају оптерећеног возила са 45 путника потрошња повећана за 18,8%.

На основу урађених симулација са оптерећеним и неоптерећеним возилом, закључак је да на линији бр.29 у реалним условима рада потрошња електричне енергије Е-буса Higer KLQ6125GEV3 у смеру "А" је у границама од 1,461 kWh·km<sup>-1</sup> до 1,782 kWh·km<sup>-1</sup>, док у смеру "Б" дијапазон потрошње електричне енергије Е-буса је од 0,912 kWh·km<sup>-1</sup> до 1,134 kWh·km<sup>-1</sup>.

Симулација рада Е-буса на линији бр.29 која је урађена на основу реалног броја путника који се превозе у поподневном вршном оптерећењу у смеру "А", што је приказано у тачки 7.2, слика 7.6, представљено је у табели 10.42.

Табела 10.42 Резултати симулације рада Е-буса Higer KLQ6125GEV3 на линији бр.29, смер "А", поподневно вршно оптерећење (реални број путника)

| Линија бр.29<br>Смер "А"<br>(реални број<br>путника) | $T_{pA}$<br>hh:mm:ss | $E_{pusA}$<br>kWh | $E_{rusA}$<br>kWh | $\Delta E_{usA}$<br>kWh | $\lambda_{usA}$<br>% | $E'_{ebusLA}$<br>kWh·km <sup>-1</sup> |
|--|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------------|----------------------|---------------------------------------|
| симулација 1-а                                       | 0:38:10              | 17,862            | 2,768             | 15,094                  | 15,498               | 1,747                                 |
| симулација 2-а                                       | 0:38:42              | 17,949            | 2,764             | 15,185                  | 15,400               | 1,758                                 |
| симулација 3-а                                       | 0:38:05              | 17,862            | 2,801             | 15,062                  | 15,680               | 1,743                                 |
| симулација 4-а                                       | 0:38:47              | 18,070            | 2,838             | 15,232                  | 15,704               | 1,763                                 |
| симулација 5-а                                       | 0:38:34              | 17,886            | 2,766             | 15,120                  | 15,463               | 1,750                                 |
| симулација 6-а                                       | 0:38:41              | 17,839            | 2,756             | 15,083                  | 15,449               | 1,746                                 |
| симулација 7-а                                       | 0:38:27              | 17,967            | 2,795             | 15,172                  | 15,555               | 1,756                                 |
| симулација 8-а                                       | 0:38:58              | 17,951            | 2,809             | 15,142                  | 15,647               | 1,753                                 |
| симулација 9-а                                       | 0:39:02              | 17,878            | 2,745             | 15,133                  | 15,353               | 1,752                                 |
| симулација 10-а                                      | 0:39:30              | 17,860            | 2,758             | 15,102                  | 15,445               | 1,748                                 |
| симулација 11-а                                      | 0:39:04              | 18,043            | 2,796             | 15,247                  | 15,498               | 1,765                                 |
| симулација 12-а                                      | 0:38:38              | 17,924            | 2,817             | 15,107                  | 15,715               | 1,749                                 |
| симулација 13-а                                      | 0:38:39              | 17,947            | 2,795             | 15,153                  | 15,571               | 1,754                                 |
| симулација 14-а                                      | 0:38:26              | 17,867            | 2,801             | 15,066                  | 15,677               | 1,744                                 |
| симулација 15-а                                      | 0:39:03              | 17,625            | 2,497             | 15,129                  | 14,165               | 1,751                                 |
| симулација 16-а                                      | 0:39:02              | 17,652            | 2,478             | 15,174                  | 14,037               | 1,756                                 |
| симулација 17-а                                      | 0:38:26              | 17,781            | 2,744             | 15,036                  | 15,435               | 1,740                                 |
| симулација 18-а                                      | 0:39:29              | 18,005            | 2,605             | 15,400                  | 14,468               | 1,782                                 |
| симулација 19-а                                      | 0:38:43              | 17,820            | 2,802             | 15,017                  | 15,726               | 1,738                                 |
| симулација 20-а                                      | 0:38:36              | 17,540            | 2,460             | 15,080                  | 14,025               | 1,745                                 |

Табела 10.43 Преглед средњих, минималних и максималних резултата симулације рада Е-буса Higer KLQ6125GEV3 на линији бр.29, смер "А", поподневно вршно оптерећење (реални број путника)

| Линија бр.29<br>Смер "А"<br>(реални број<br>путника) | $T_{pA}$<br>hh:mm:ss | $E_{pusA}$<br>kWh | $E_{rusA}$<br>kWh | $\Delta E_{usA}$<br>kWh | $\lambda_{usA}$<br>% | $E'_{ebusLA}$<br>kWh·km <sup>-1</sup> |
|--|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------------|----------------------|---------------------------------------|
| Средња вредност                                      | 0:38:54              | 17,320            | 2,544             | 14,775                  | 14,687               | 1,710                                 |
| Мин. вредност  | 0:38:14              | 17,029            | 2,840             | 14,585                  | 14,155               | 1,688                                 |
| Макс. вредност                                       | 0:39:31              | 17,633            | 2,414             | 15,034                  | 16,106               | 1,740                                 |

Добијени резултати потрошње електричне енергије Е-буса Higer KLQ6125GEV3 при реалном оптерећењу путника које је карактеристично за послеподневно вршно оптерећење крећу се у опсегу од 1,688 kWh·km<sup>-1</sup> до 1,740 kWh·km<sup>-1</sup>, односно просечна потрошња електричне енергије износи 1,710 kWh·km<sup>-1</sup>. Добијени резултати симулације реалног тока путника су сагласни са претходним закључком да је потрошња електричне енергије Е-буса Higer KLQ6125GEV3 у смеру "А" у очекиваним вредностима од 1,461 kWh·km<sup>-1</sup> до 1,782 kWh·km<sup>-1</sup>.



## 11. ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА

Смањење потрошње фосилних горива, а самим тим и аерозагађења, могу се значајно унапредити енергетским и еколошким управљањем у аутобуском подсистему јавног градског транспорта, а један од најефикаснијих начина јесте замена постојећих аутобуса са конвенционалним погоном са аутобусима на електрични погон.

Значајније коришћења аутобуса на електрични погон у многим градовима света доказано је статистичким подацима раста броја аутобуса на електрични погон који су у раду широм света од 2008. до 2020. године. Тренд даљег раста броја возила у раду може се очекивати на основу великог броја тендерских процедура које су у току у многим градовима света а односе се на куповину аутобуса на електрични погон, све већом комерцијалном понудом на тржишту од стране готово свих произвођача аутобуса и позитивних искустава у експлоатацији овог типа аутобуса.

Ограничавајући фактор за још масовнију употребу аутобуса на електрични погон, посебно у државама са мањом економском развијеношћу је цена аутобуса на електрични погон која је двоструко већа од цене аутобуса са погоном на дизел гориво. С обзиром да су оперативни трошкови експлоатације код Е-буса вишеструко мањи у поређењу са аутобусима на дизел гориво и КПП како је приказано у студији случаја која је урађена у оквиру дисертације, произилази да је очекивани период када се укупни трошкови изједначавају после 7. године у поређењу са аутобусима на дизел гориво и после 12. године у поређењу са аутобусима на КПП.

На основу мерења потрошње погонске енергије аутобуса различитих погонских конфигурација на линијама јавног градског транспорта у Београду дошло се до закључка да је на линији бр. 41 (Студентски трг-Бањица II) енергетска ефикасност аутобуса на електрични погон BYD E-12 већа 3,67 пута у поређењу са аутобусом ИК-112N који користи дизел гориво. Поређење енергетске ефикасности Е-буса Niger KLQ6125GEV3 и аутобуса ИК-112N са погоном на дизел гориво и аутобуса на КПП MAZ-203 CNG на линији ЕКО 1 (Вуков споменик-Насеље Белвил) у Београду, на основу просечне потрошње електричне енергије, дизел горива и КПП, када није коришћен систем за хлађење или грејање возила, доказано је да Е-бус има већу енергетску ефикасност 3,54 пута од дизел аутобуса. Код поређења са аутобусима са погоном на КПП у случају аутобуса MAZ-203 CNG, Е-бус има већу енергетску ефикасност 4,94 пута. Добијени резултати истраживања енергетске ефикасности аутобуса на електрични погон и поређење са аутобусима различитих погонских система на линијама јавног градског транспорта у Београду имају висок степен подударности са сличним истраживањима која су приказана у Поглављу 2. У највећем броју анализираних случајева који су приказани у литератури [45,56,59,131] енергетска ефикасност аутобуса на електрични погон била је између 2,8 и 4,1 пута већа у поређењу са аутобусима са погоном на дизел гориво и око 5,1 пута већа у поређењу са аутобусима са погоном на КПП.

На основу статистичке анализе узорка од 704 мерења потрошње електричне енергије Е-бус Niger KLQ6125GEV3 изражене у  $\text{kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ , која је остварена на линији ЕКО 1 током пролећно-јесењег периода, када није или је минимално коришћен систем за грејање или хлађење унутрашњег простора возила, показано

је да потрошња електричне енергије Е-буса зависи од периода рада Е-буса током радног дана.

Остварене потрошње у смеру "А" по карактеристичним периодима рада у току дана су: први поласци  $0,943 \text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ , јутарње вршно оптерећење  $1,112 \text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ , међувршно оптерећење  $1,043 \text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ , поподневно вршно оптерећење  $1,209 \text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ , вечерње оптерећење  $1,049 \text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ , задњи поласци  $0,977 \text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ .

До сличних закључака може се доћи и за смер "Б". Остварене потрошње у смеру "Б" по карактеристичним периодима рада у току дана су: први поласци  $1,212 \text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ , јутарње вршно оптерећење  $1,393 \text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ , међувршно оптерећење  $1,354 \text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ , поподневно вршно оптерећење  $1,523 \text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ , вечерње оптерећење  $1,337 \text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ , задњи поласци  $1,223 \text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ .

Коришћењем теста једнакости средњих вредности два основна скупа помоћу њихових узорака, дошло се до закључка да је разлика у потрошњи електричне енергије изражена у  $\text{kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ , статистички значајна у свим поређењима карактеристичних периода рада Е-буса, осим у случају поређења потрошње која је остварена у периоду првих полазака и задњих, као и у случају поређења међувршног оптерећења и вечерњег оптерећења. У овим карактеристичним периодима број превезених путника је приближно исти као и саобраћајни услови, што за последицу има да не постоји статистички значај у оствареној средњој потрошњи електричне енергије по пређеном километру.

Зависност потрошње електричне енергије Е-буса изражене у  $\text{kWh}\cdot\text{km}^{-1}$  и остварених превозних брзина изражених у  $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ , описује се степеном функцијом другог реда са високим степеном корелативне зависности.

У карактеристичним периодима кад је остварена најмања потрошња електричне енергије (први поласци и задњи поласци), остварена је највећа превозна брзина. У карактеристичним периодима са највећом потрошњом електричне енергије (поподневно и јутарње вршно оптерећење), остварене су најмање превозне брзине. Превозне брзине остварене у међувршном и вечерњем оптерећењу имају приближне вредности, тако да разлика нема статистички значај.

Присуство деоница трасе линије са негативним нагибом (деонице у паду) и утицај на рекуперацију и потрошњу електричне енергије Е-буса истраживан је експерименталним мерењима на линији ЕКО 1 и линији бр. 29. Експерименталним мерењима која су обављена на Е-бусу Niger KLQ6125GEV3 у реалним условима рада на линији ЕКО 1 дошло се до закључка да је највећи коефицијент ефикасности рекуперације,  $\lambda_{uc}$ , изражен кроз однос електричне енергије која је враћена у суперкондензатор и укупно преузете електричне енергије из суперкондензатора, постигнут у смеру "А" и износи 28,55%, док је максимална вредност  $\lambda_{uc}$  у смеру "Б" 19,57%.

На основу спроведеног мерења на Е-бусу Niger KLQ6125GEV3, на линији бр. 29 (Дорћол-Медаковић III) највећа вредност коефицијента ефикасности рекуперације  $\lambda_{uc}$ , постигнута је у смеру "Б" и износи 33,77%, док је остварена вредност  $\lambda_{uc}$  у смеру "А" 18,38%. Резултати мерења коефицијента рекуперације  $\lambda_{rec}$  израженог као однос укупно генерисане електричне енергије погонског система електромотор-инвертор и укупно потрошене електричне енергије погонског система на линији бр. 29 доказују да је вредност  $\lambda_{rec}$  у смеру "Б" износи 43,73%, док је у смеру "А" вредност 22,14%.

Ако се упореде добијене вредности коефицијента ефикасности рекулпације на линији ЕКО 1 и линији бр. 29, закључак је да што је већа заступљеност деоница са негативним нагибом пута на траси линије и где је већа просечна вредност негативног нагиба добијени су значајно већи  $\lambda_{uc}$ , што је случај на линији бр.29, смер "Б".

До истог закључка дошло се у анализи потрошње електричне енергије Е-буса изражене у  $kWh \cdot km^{-1}$  и утицаја присуства деоница трасе линије са негативним нагибом. У свим поређењима просечне потрошње Е-буса оствареним по смеровима кретања, потрошња је била мања где је било веће присуство деоница трасе линије са негативним нагибом.

Значајан утицајни фактор на потрошњу електричне енергије Е-буса представља стил вожње. Непосредним мерењем потрошње електричне енергије Е-буса током "нултих" вожњи где је утицај стила вожње доминантан дошло се до закључка да је разлика у потрошњи електричне енергије између "нулте" вожње са најмањом оствареном потрошњом и највећом 29,7%. Добијени резултати доказују да утицај стила вожње може значајно утицати на повећање потрошње електричне енергије Е-буса у приближно истим експлоатационим условима рада.

Утицај рада система за грејање и хлађење Е-буса истражен је на основу анализе потрошње електричне енергије у различитим периодима експлоатације током године. У пролећно-јесењем периоду рада Е-буса, нема значајнијег коришћења система за грејање и хлађење, односно коришћење је минимално. Доказано је да разлика остварене просечне потрошње електричне енергије Е-буса у функцији спољне температуре током пролећно-јесењег периода рада има случајни карактер. Када су спољне температуре између  $17^{\circ}C$  и  $18^{\circ}C$ , остварује се најмања потрошња електричне енергије изражене у  $kWh \cdot km^{-1}$ .

У летњем периоду рада Е-буса карактеристичан је константан пораст спољне температуре од јутра до поподневних часова. Да би се обезбедио потребни термички комфор за путнике, интензивно се користи систем за хлађење унутрашњости возила. Зависност потрошње електричне енергије Е-буса изражене у  $kWh \cdot km^{-1}$  и спољне температуре изражене у  $^{\circ}C$ , која је остварена у летњем периоду рада описује се степеном функцијом другог реда што потврђује изузетно високу зависност ове две величине. У летњем периоду рада Е-буса најмања потрошња електричне енергије Е-буса је у првим јутарњим поласцима када су спољне температуре између  $16^{\circ}C$  и  $18^{\circ}C$ , кад нема потребе за коришћењем система за хлађење и када је број путника који се превози најмањи. Потрошња електричне енергије изражена у  $kWh \cdot km^{-1}$  у овом карактеристичном периоду рада је приближно иста као и током пролећно-јесењег периода. Са порастом спољне температуре и броја путника у возилу интензитет коришћења и ангажована снага система за хлађење се повећавају, тако да укупна потрошња Е-буса расте према описаној степеној функцији другог реда.

Зависност потрошње електричне енергије Е-буса изражене у  $kWh \cdot km^{-1}$  и спољне температуре изражене у  $^{\circ}C$ , која је остварена у зимском периоду рада за смер "А", и смер "Б" описује се степеном функцијом трећег реда. У зимском периоду рада Е-буса највећа потрошња електричне енергије Е-буса је при екстремно ниским температурама, које су најчешће у раним јутарњим сатима, при чему је коришћење система за грејање најинтензивније и са највећом ангажованом снагом како би се постигла потребна температура амбијента у путничком и возачком простору.

Анализа резултата просечне потрошње електричне енергије по карактеристичним периодима рада Е-буса у зимском периоду, битно се разликује у поређењу са летњим, а посебно пролећно-јесењим периодом. Приликом првих полазака, када су саобраћајни услови најповољнији у смислу најмањег броја путника у возилу и највеће превозне брзине, највећа је потрошња електричне енергије Е-буса, што доказује доминантан утицај рада система за грејање на потрошњу електричне енергије Е-буса.

Еколошке предности коришћења аутобуса на електрични погон су доказане на примеру процене количине емисије штетних издувних гасова која би настала на локалном нивоу (ТТW), радом 5 аутобуса са погоном на дизел гориво који су опремљени са моторима ЕУРО 4 или радом 5 аутобуса са погоном на КПГ са ЕУРО 6 моторима, на линији ЕКО 1 у Београду. Пет аутобуса са погоном на дизел гориво ИК-112N, који испуњавају еколошке норме ЕУРО 4, остварили би емисију штетних издувних гасова у следећим количинама: угљен-моноксид (СО) 2.183,6 kg, угљоводоници (СхНу) 300,2 kg, азотни-оксиди (NOx) 1.910,6 kg и суспендоване микрочестице (PM<sub>10</sub>) 16,4 kg. Укупна емисија 5 аутобуса са погоном на КПГ износила би: угљен-моноксид (СО) 2.347,1 kg, угљоводоници (СхНу) 93,9 kg, остаци метана (СН<sub>4</sub>) 293,4 kg, азотни оксиди (NOx) 158,5 kg и суспендоване микрочестице (PM<sub>10</sub>) 5,8 kg. Очигледно је да наведене емисије штетних издувних гасова нису присутне код рада аутобуса на електрични погон на линији ЕКО 1 у Београду.

На основу урађене анализе WTW може се закључити да аутобуси на електрични погон Higer KLQ6125GEV3 који раде на линији ЕКО 1 имају индиректни утицај на животну средину посматрано на ширем нивоу (Република Србија) кроз емисију од 389,5 тоне угљен-диоксида (СО<sub>2</sub>) која настаје у производњи електричне енергије. У поређењу са емисијом угљен-диоксида која потиче од аутобуса са погоном на дизел гориво, годишњи ниво (анализа WTW) која износи 443,3 тоне, може се закључити да је код аутобуса на електрични погон мања за 12,1%. У односу на аутобусе са погоном на КПГ емисија СО<sub>2</sub> на годишњем нивоу код аутобуса на електрични погон мања је за 16,4%. У зимском периоду рада због интензивног коришћења система за грејање код Е-буса значајно се повећава потрошња електричне енергије возила у целини и не постоји ефекат смањења емисије угљен диоксида (СО<sub>2</sub>) у поређењу са аутобусима на дизел гориво.

На основу непосредног мерења нивоа буке при брзинама кретања од 30 km·h<sup>-1</sup> и 40 km·h<sup>-1</sup> на Е-бусу Higer KLQ6125GEV3, измерене су средње вредности нивоа буке које су у поређењу са аутобусом на дизел гориво MAZ-203 (ЕУРО 5) мање између 7,1÷10,9%, а у поређењу са аутобусом на КПГ MAZ-203 CNG мање између 2,1÷8,6%.

Резултати симулације рада Е-буса Higer KLQ6125GEV3 на основном возном циклусу чије су карактеристике идентичне реализованом основном возном циклусу на полигону, доказују да су процентуалне разлике између измерених и симулираних вредности преузете и враћене електричне енергије суперкондензатора минималне.

На основу поређења резултата симулација потрошње електричне енергије Е-буса изражене у kWh·km<sup>-1</sup>, као случајних догађаја за различите сценарије рада Е-буса Higer KLQ6125GEV3 на линијама ЕКО 1 и бр. 29 у Београду, са статистичким скуповима емпиријских резултата за пролећно-јесењи период утврђено је да су одступања резултата испод 5%, чиме је верификован симулациони модел.

### 11.1 Доприноси спроведених истраживања

Доприноси истраживања која су урађена у оквиру дисертације могу се представити кроз:

- **Теоријски допринос:**
- Преглед стања у научној области која се бави аутобусима на електрични погон;
- Анализа погонских конфигурација код аутобуса на електрични погон и главних компоненти: погона, управљања, система складиштења електричне енергије и пуњења;
- Анализа теорије кретања, кочења и рекуперације код аутобуса на електрични погон и формирање одговарајућих математичких модела који описују њихову међусобну зависност;
- Развој симулационог програма помоћу кога се може са високом поузданошћу симулирати рад Е-буса и добити његова потрошња електричне енергије на било којој линији јавног градског транспорта.
  
- **Практични допринос:**
- Методологија и резултати мерења потрошње електричне енергије Е-буса у карактеристичним периодима рада током дана и године у реалним условима експлоатације на линији јавног градског транспорта у Београду;
- Методологија и резултати мерења преузете и враћене електричне енергије у суперкондензатор, потрошене и енергије рекуперације система електромотор-инвертор Е-буса, на линијама јавног градског транспорта у Београду, коришћењем мерне опреме или преузимањем података преко BMS контролне јединице Е-буса;
- Развој методологије за поређење енергетске ефикасности Е-буса, аутобуса са погоном на дизел гориво и аутобуса са погоном на КПП на изабраним линијама јавног градског транспорта у Београду;
- Елементи истраживања утицаја стила вожње на потрошњу електричне енергије и енергетску ефикасност Е-буса;
- Анализа еколошких ефеката рада Е-буса са аспекта анализе TTW и WTW, у реалним условима експлоатације на линији јавног градског транспорта и мерења нивоа емитоване буке на полигону;
- Примена студије случаја за поређење укупних трошкова експлоатације у животном веку Е-буса, аутобуса са погоном на дизел гориво и аутобуса на КПП. Приказана је методологија економске анализе, која се може применити у процесу одлучивања економске оправданости увођења аутобуса са одговарајућим погоном.

Теоријски и експериментални резултати добијени у истраживањима као и симулациони модел могу се употребити у процесу доношења одлука при планирању и увођењу линија јавног градског транспорта на којима ће радити аутобуси на електрични погон.

Прве верзије симулационог модела успешно су коришћене у ЈКП ГСП "Београд" у процесу доношења одлуке везано за избор линије ЕКО 1 и типа аутобуса на електрични погон у Београду током 2015. године.

- **Допринос научној заједници кроз објављивање радова**

Верификација резултата истраживања је обављена објављивањем радова у научним часописима са импакт фактором (impact factor) и на међународним научним конференцијама од којих су најважнији радови:

[1] **Mišanović S.**, Živanović Z., Tica S.: *Energy efficiency of different bus subsystems in Belgrade public transport*, Thermal Science, Year 2015, Vol.19, No.6, pp.2233-2244, ISSN 2334-7163, DOI REFERENCE: <https://doi.org/10.2298/TSCI151116193M>, M(22).

[2] Tomić M., Jovanović Z., **Mišanović S.**, Živanović Z., Masončić, Z.: *Some energetic and ecological aspects of different city bus drive systems*, Thermal Science, Year 2018, Vol.22, No.3, pp.1493-1504, ISSN 2334-7163,

DOI REFERENCE: <https://doi.org/10.2298/TSCI171027310T>, M(22).

[3] **Mišanović S.**, Taranović D., Krstić P., Živić D.: *Measurement of recovery electricity on the E-bus Higer KLQ6125GEV3 on EKO 1 line in Belgrade and impact on energy efficiency*, 8<sup>th</sup> International Congress Motor Vehicles & Motors 2020, Kragujevac, 8-9 October 2020, Book of Proceedings, ISBN 978-86-6335-074-8, pp.67-75, M(33).

[4] **Mišanović S.**, Živanović P., Savković D., Krstić P., Ivanov S., Stević S.: *Two-year successful exploitation of the electric buses in Belgrade*, Mobility&Vehicle Mechanics, Vol.45, No.1,(2019), pp.17-27, DOI:10.24874/mvm.2019.45.01.02, M(52).

[5] **Mišanović S.**, Taranović D., Lukić J., Pešić R., Glišović J.: *The impact of the system for heating and air-conditioning on the energy efficiency of the electric drive bus (E-bus)*, 7<sup>th</sup> International Congress Motor Vehicles & Motors 2018, Kragujevac, 4-5 October 2018, Proceedings, ISBN 978-86-6335-055-7, pp.115-137, M(33).

[6] **Mišanović S.**, Glišović J., Taranović D., Pešić R.: *Electric Energy Consumption and Recuperation on E-bus in Different Exploitation Conditions*, 18<sup>th</sup> Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia, October 17–20, 2017, Sokobanja, Serbia, Proceedings, ISBN 978-86-6055-098-1, pp.961-976, M(33).

[7] Taranovic D., **Mišanović S.**, Pešić R., Tica S.: *Development tendencies for electricity storage systems used on buses with pure electric drive*, International Congress Motor Vehicles & Motors 2016, Kragujevac, 6-7 October 2016, Proceedings, ISBN 978-86-6335-037-3, pp.119-126, M(33).

## 11.2 Ограничења у истраживању

Резултати спроведених мерења, моделирања и симулације у дисертацији уско су везани за аутобус на електрични погон Higer KLQ6125GEV3 који користи суперкондензатор за складиштење електричне енергије капацитета 20 kWh.

Ово је потребно нагласити с обзиром да код аутобуса на електрични погон, зависно од примењеног система складиштења електричне енергије, типа и капацитета батерије или суперкондензатора, постоје значајне разлике у маси празног возила. Код аутобуса Higer KLQ6125GEV3 маса празног возила је 12.550 kg а у случају Е-буса са батеријама великог капацитета маса празног возила износи преко 14.000 kg. Већа маса празног возила додатно утиче на савлађивање отпора кретања возила, односно повећава потрошњу електричне енергије Е-буса.

Такође и перформансе погонских електромотора, примењени систем управљања погоном и регенеративним кочењем су неки од фактора који утичу на енергетску ефикасност аутобуса на електрични погон, тако да резултати истраживања могу

имати одређене разлике ако се ради о различитим врстама аутобуса на електрични погон.

Резултати економског вредновања у студији случаја добијени су на основу важећих цена: аутобуса различитих погонских система, инфраструктуре за аутобусе на електрични погон и КПП на тржишту Европске уније као и цена: погонског горива, електричне енергије и каматне стопе које су важиле на крају 2018. године у Републици Србији.

### **11.3 Даљи правци истраживања**

Резултати приказани у дисертацији могу да послуже као основа и репер за будућа слична истраживања која ће се спроводити са аутобусима на електрични погон различитих концепата у условима рада на линијама јавног градског транспорта. Реално је очекивати да ће у будућности возила бити технички унапређена у погледу смањења масе, даље оптимизације рада погонских система, система за складиштење електричне енергије, помоћних уређаја, система за грејање и хлађење што ће допринети смањењу електричних губитака односно додатно повећати енергетску ефикасност. Један од праваца даљег истраживања је веће истраживање утицаја стила возње на потрошњу електричне енергије и рекулпацију Е-буса у различитим режимима рада аутобуса на електрични погон. Такође један од праваца будућих истраживања представља даље унапређење симулационог програма SimE-bus, који се пре свега односи на што већу прецизност моделирања регенеративног кочног момента у режиму кочења на основном возном циклусу и што реалнијег моделирања основних возних циклуса на међустаничним растојањима када се симулира рад Е-буса на линији јавног градског транспорта.

## 12. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Werner Z.: *Alternative World Energy Outlook 2005 a possible path towards a sustainable future*, Conference "The soul of the empire", workshop 3: "Mankind on a hot tin roof. Kyoto heretics braving the greenhouse effect", Rimini, 28-30 October, 2005.
- [2] International Energy Agency: *Energy Climate and Change*, OECD/IEA, France, 2015.
- [3] Милосављевић Б., Пешић Р., Бабић С.: *Еколошки аспекти коришћења моторних возила*, Фестивал квалитета 2009, 4. Национална конференција о квалитету живота, Крагујевац, 2009, 20-22 мај, pp. 9-14, ISBN 978-86-86663-33-7.
- [4] Zatežić M., Mujić Đž.: *Saobraćaj i životna sredina u sistemu kvaliteta*, 1st International Conference "Ecological Safety in Post-Modern Environment", 26-27 Juny 2009, Banja Luka, RS, BiH.
- [5] WHO, *Guidelines for Air Quality*, World Health Organization, Geneva, 2000.
- [6] <http://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment>, приступ сајту 15.1.2018.године.
- [7] Borowik, L., & Artur.: *Modernization of a trolleybus line system in Tychy as an example of eco-efficient initiative towards a sustainable transport system*. Journal of Cleaner Production, pp. 188-198, December 2015.
- [8] [https://ec.europa.eu/clima/policies/international/paris\\_protocol/transport\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/international/paris_protocol/transport_en), приступ сајту 12.10.2018.године.
- [9] <https://www.eea.europa.eu/highlights/road-traffic-remains-biggest-source>, European Environment Agency, 2017, приступ сајту 12.10.2018.године.
- [10] UITP-Bus Division, [www.uitp.org/public-transport/bus/index.cfm](http://www.uitp.org/public-transport/bus/index.cfm), приступ сајту 1.6. 2012.
- [11] Bus system in Europe: *Current fleets and future trends*, 3IBS project EU, 2012-2015.
- [12] Environmental compatibility and efficiency: *The fuel choice Official Position Paper of the UITP*, 2005.
- [13] ЈКП ГСП "Београд": *Информациони систем, база података потрошње погонског горива код аутобуса*, приступљено (10.1.2019; 31.12.2019, 11.03.2020).
- [14] Vuchic V.R.: *Transportation for livable cities*, New Brunswick, New Jersey: Centre for Urban Policy Research, 1999.
- [15] Tica S.: *Sistemi javnog transporta putnika – Elementi tehnologije, organizacije i upravljanja*, Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet Beograd, 2016.
- [16] Misanovic S.: *Exploitation and environmentally aspects of hybrid buses in European cities* International Congress Motor Vehicles & Motors 2012, Kragujevac, 3-5 October 2012, pp.280-288, ISBN 978-86-86663-91-7.
- [17] Glotz-Richter M.,& Koch H.: *Electrification of public transport in cities* (Horizon 2020 ELIPTIC Project). Transportation Research Procedia, 2614-2619. April 2016.
- [18] Directive 33/2009/EC: *On the promotion of clean and energy efficient road transport vehicles*, 23 April 2009, pp. L 120/5, L 120/12.



- [19] Directive 94/2014/EC: *On the deployment of alternative fuels infrastructure*, 22 October 2014, L 307/1.
- [20] EC 2011a - *European Commission White Paper, Road to a Single European Transport Area e Towards a Competitive and Resource Efficient Transport System*, Brussels :EC, 2832011 COM (2011) 144 Final, 2011.
- [21] Clean Buses – *Experiences with Fuel and Technology Options*, Clean fleets, February 2014, [http://www.clean-fleets.eu/fileadmin/files/Clean\\_Buses-Experiences\\_with\\_Fuel\\_and\\_Technology\\_Options.pdf](http://www.clean-fleets.eu/fileadmin/files/Clean_Buses-Experiences_with_Fuel_and_Technology_Options.pdf).
- [22] Wicks F., & Donnelly K.: *Modeling Regenerative Braking and Storage for Vehicles*. Energy Conversion Engineering Conference, 1997. IECEC-97, Proceedings of the 32nd Intersociety, p.2030-2035, 1997.
- [23] Lin C-Chiao, Filipi Z., Wang Y., Louca L., Peng H., Assanis D., & Stein J.: *Integrated , Feed-Forward Hybrid Electric Vehicle Simulation in SIMULINK and its Use for Power Management Studies*. 2001-01-1334. Automotive Research Center The Univeristy of Michigan, 2001.
- [24] Cikanek. S. R.& Bailey K. E.: *Regenerative braking system for a hybrid electric vehicle*. Proceedings of the 2002 American Control Conference (IEEE Cat. No.CH37301) (pp. 3129-3134). American Automatic Control Council. doi:10.1109/ACC.2002.1025270, 2002.
- [25] Zhang J., Lu X., Xue J., Li B.: *Regenerative Braking System for Series Hybrid Electric City Bus*, The World Electric Vehicle Journal, Vol 2, Issue 4, ISSN 2032-6653, p.0363-0369, 2008.
- [26] Zilin Ma: *Parameters Design for a Parallel Hybrid Electric Bus Using Regenerative Brake Model*, Hindawi Publishing Corporation Advances in Mechanical Engineering, Volume2014, Article, ID760815, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/760815>.
- [27] Choi J., Jeong J., Park Y., Chai S.W.: *Analysis of regenerative braking effect to improve fuel economy for E-REV bus based on simulation*, EVS28 International Electric Vehicle Symposium and Exhibition, Republic of Korea, 3-6 May 2015.
- [28] Khanipour A., Ebrahimi M., Seale W.J.: *Conventional Design and Simulation of an Urban Hybrid Bus*. International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering, Vol:1, No:4, 2007, p.146-152.
- [29] Liang Li, Zhang Y., Yang C., Yan B., Martinez M.: *Model predictive control-based efficient energy recovery control startegy for regenerative braking system of hybrid electric bus*. Energy Conversion and Management 111 (2016), p. 299-314, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.12.077>.
- [30] Zhongpeng Yu, Chu L., Ma K., Ren L.: *Coordinated Control of Regenerative Braking System for a Hybrid Electric Bus*, 2<sup>nd</sup> International Conference on Electric & Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT-2012),ISBN 9781629930862, p.1879-1884. 7 September 2012, Shenyang, China.
- [31] Sangtarash F., Esfahanian V., Nehzati H., Haddadi S., Bavanpour M.A., Haghpanah B.: *Efecet od Different Regenerative Braking Strategies on Braking Performance and Fuel Economy in a Hybrid Electric Bus Employing Cruise Vehicle Simulation*, SAE International, 2008-1-1561, 2008.

- [32] Barrero R., Coosemans T., Van Mierlo: *Hybrid buses: Defining the power flow management strategy and energy storage system needs*, World Electric vehicle Journal Vol.3-ISSN 2032-6653, p.0299-0310, 2009, EVS24 Stavanger, 13-16 May 2009, Norway.
- [33] Chan C.C.: *The state of the art of electric and hybrid vehicles*, Proc.IEEE, 2002, 90 (2), p.247-275.
- [34] Cao B.G., Zhang C.W., Bai Z.F: *Trend of development of technology for electric vehicles (in Chinese)*, J.Xi'an Jiaotong University, 38(1), p.1-5, 2004.
- [35] M Ye, Bai Z.F., Cao B.G: *Energy recovery for battery electric vehicles*, Proc. ImechE Vol.222, 2008, Part D: J. Automobile Engineering, p.1827-1839, DOI: 10.1243/09544070JAUTO691.
- [36] Martins L., Brito J., Rocha A., Martins J.: *Regenerative braking potential and energy simulations for a plug in hybrid electric vehicle under real driving conditions*, Proceedings of IMECE09:2009 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 13-19 November 2009, Lake Buena Vista, Florida, USA. DOI:10.1115/IMECE2009-13077.
- [37] Boerboom M.: *Electric Vehicle Blended Braking- Maximizing energy recovery while maintaining vehicle stability and maneuverability*, Master's Thesis 2012:12, ISSN 1652-8557, Chalmers University of Technology Goteborg, Sweden.
- [38] Grbović P.: *Ultra-capacitor based regenerative energy storage and power factor correction device for controlled electric drives*, PhD Dissertation, Ecole Centrale de Lille, 2010. English NNT:2010ECLI0009. Tel-00585405.
- [39] Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking: *Study "Urban buses: Alternative powertrains for Europe, A fact based analysis of the role of diesel hybrid, hydrogen fuel cell, trolley and electric powertrains"*, November 2012, Brussels.
- [40] Rieck F.G, NEMS: *Electric buses at Rotterdam, Clean fleets, Bremen*, 12 December 2014. [http://www.clean-fleets.eu/fileadmin/files/e-Busz\\_Rotterdam\\_final\\_Ecomobiel-Bremen -Rieck\\_small .pdf](http://www.clean-fleets.eu/fileadmin/files/e-Busz_Rotterdam_final_Ecomobiel-Bremen -Rieck_small.pdf).
- [41] Perrotta D., Ribeiro B., Rossetti R., Afonso J.: *On the potential of regenerative braking of electric buses as a function of their itinerary*, 15<sup>th</sup> meeting of the EURO Working group on Transportation, 2012, Procedia-Social and Behavioral Sciences [00 (2012) 000-000.
- [42] Wang J., Qiao J., Qi Z.: *Research on Control Strategy of Regenerative Braking and Anti-lock Braking System for Electric Vehicle*, EVS 27 Barcelona, p.1-7, 17-20 November 2013.
- [43] Pütz R.: *Operational Analysis with a HIGER-Electrobus with AOWEI-Supercaps using Energy Consumption Data in Real Operation on an Urban Bus Route in Sofia*. Report No. BELICON/CHMO-1-25.10.2014.
- [44] Erkkila K., NyLund N., *Test mule Energy consumption, Pre-results from laboratory tests (new methods)*, VTT Technical Research Centre of Finland, 8 February 2014.
- [45] Grutter J.: *Real world performances of Hybrid and Electric buses-Environmental and Financial Performance of Hybrid and Battery Electric Transit Buses*, Grutter Consulting, December 2014.
- [46] Xiao-chuan T., Liang G., Chuan I.: *Energy Consumption Analysis and Optimization Design of Commercial Electric Vehicle Power Platform*, EVS28 Symposium, Kintex, Goyang, 3-6 May 2015, Korea.

- [47] Halmeaho T., Tammi K., Ruotsalainen S.: *Electric City Bus Energy Flow Model and its Validation by Dynamometer Test*, Conference Paper, October 2015, DOI:10.1109/VPPC.2015.7352942.
- [48] Varga B.O., Iclodean C.: *Electric Buses For Urban Transportation: Assessments On Cost, Infrastructure And Exploitation*, Annals of Oradea University, Fascicle of Management and Technological Engineering, ISSUE#1, May 2015, p.253-258. <http://www.imtuoradea.ro/auo.fmte/>, приступљено сајту 13.10.2018.
- [49] Kim J., Song I., Choi W.: *An Electric Bus a Battery Exchange System*, Energies 2015,8,ISSN 1996-1073, p.6806-6819; DOI:10.3390/en8076806.
- [50] Mišanović S., Živanović Z., Tica S.: *Energy efficiency of different bus subsystems in Belgrade public transport*, Thermal Science, Year 2015, Vol.19, No.6, p.2233-2244, ISSN 2334-7163, DOI REFERENCE: <https://doi.org/10.2298/TSCI151116193M>.
- [51] Mišanović S., Taranović D., Vasiljevic J., Novaković N.: *Technical and Economic Aspects of the Test Drive Iveco CNG bus in Belgrade, compared to diesel bus and E-bus*, 15. International Conference on accomplishments in electrical, mechanical and information engineering DEMI 2019, Banja Luka, 24-25 May 2019, pp.471-478, ISBN: 978-99938-39-85-9.
- [52] Mišanović S., Glišović J., Taranović D., Pešić R.: *Electric Energy Consumption and Recuperation on E-bus in Different Exploitation Conditions*, 18<sup>th</sup> Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia, October 17 – 20, 2017, Sokobanja, Serbia, Proceedings, ISBN 978-86-6055-098-1, pp.961-976.
- [53] Благојевић И., Поповић В., Митић С., Воротовић Г., Стаменковић Д., Иванковић И., Миличић Б., Маљковић М., Фрлић Н., Жуњић М., Иванов С., Мишановић С.: *Пројекат-Истраживање утицаја стила возње на енергетску ефикасност код аутобуса на електрични погон*, Машински факултет у Београду, 2020.година. Наручилац пројекта Градска Управа Београд-Секретаријат за јавни превоз.
- [54] Eudy L., Prohaska R., Kelly K., Post M.: *Foothil Transit Battery Electric Bus Demonstartion Results*, Technical Report NREL/TP-5400-65274, January 2016, National Renewable Energy Laboratory 15013 Denver West Parkway, Golden, USA.
- [55] Aber J.: *Electric Bus Analysis for New York City Transit*, May 2016, Columbia University-New York, USA.
- [56] Gis W., Kruczynski S., Taubert S., Wierzejski A.: *Studies of energy use by electric buses in SORT tests*, Combustion Engines.2017, 170(3),135-138.Doi:10.19206/CE-2017-323.
- [57] Pardo R.M.: *Uncertainty in Electric Bus Mass and its Influence in Energy Consumption*, Master's thesis, Aalto University Finland, School of Engineering Design and Production,2017.
- [58] Vepsäläinen J., Kivekäs K., Otto K.,Lajunen A., Tammi K.: *Development and validation of energy demand uncertainty model for electric city buses*, Transportation Research Part D63 (2018), p. 347-361, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.06.004>.
- [59] Kivekäs K., Lajunen A., Vepsäläinen J., Tammi K.: *City Bus Powertrain Comparasion: Driving Cycle Variation and Passenger Load Sensitivity Analysis*, Energies 2018,11,1755; doi:10.3390/en11071755.

- [60] Kotiev G., Butarovich D., Kositsyn B.: *Energy efficient motion control of the electric bus on route*, IOP Conf.Series:Materials Science and Engineering 315 (2018) 012014, doi:10.1088/1757-899X/315/1/01/2014.
- [61] Mattes P.,Oliveira A., Montenegro A., Ruther R.: *Performance of an electric bus, powered by solar energy*, VII Congresso Brasileiro de Energia Solar-Gramadao 17-20 April 2018, p.1-9, <https://www.researchgate.net/publication/325022746>.
- [62] Tomić M., Jovanović Z., Mišanović S., Živanović Z., Masončić,Z.: *Some energetic and ecological aspects of diferent city bus drive systems*, Thermal Science, Year 2018, Vol.22, Issue3, pp.1493-1504, ISSN2334-7163, DOI REFERENCE:<https://doi.org/10.2298/TSCI171027310T> .
- [63] Skručaný T., Milojevic S., Semanova S., Čechovič T.,Figlus T., Synak F.:*The Energy Efficiency of Electric Energy as Traction Used in Transport*, Transport technic and technology,Volume XIV, Issue 2, Year 2018,p.9-14, DOI: 10.2478/ttt-2018-0005.
- [64] Mišanović S., Taranović D., Lukić J., Pešić R., Glišović J.: *The impact of the system for heating and air-conditioning on the enerrgy efficiency of the electric drive bus (E-bus)*, 7<sup>th</sup> International Congress Motor Vehicles & Motors 2018, Kragujevac, 4-5 October 2018, Proceedings, ISBN 978-86-6335-055-7, pp.115-137.
- [65] Mišanović S.,Taranović D.,Lukić J., Pesic R.: *Exploitation Specificities of E-buses in winter conditions from aspect of energy efficiency*, 14. International Conference on accomplishments in electrical, mechanical and information engineering DEMI 2017, Banja Luka, 2017, 29-30 May, pp.703-711, ISBN 978-99938-39-72-9.
- [66] Mišanović S.: *Electricity consumption of electric bus on the EKO 1 line in Belgrade in different periods of the year*, Hybrid and Electric Vehicle Technologies Symposium, February 19-21, 2019, Garden Grove (Anaheim), CA, USA.
- [67] Knot T.: *Auswirkungen elektrischer Heizungen auf die Einsatzmöglichkeiten von Batteriebusen*, Fraunhofer-Institut für Verkehrs-und Infrastruktursysteme Dresden, Report, Eliptic workshop, 5 December 2017, Bremen.
- [68] Kratzing R.: *HEAT2GO-Entwicklung eines schnellladefähigen Latentwärmespeichers für die Beheizung von Elektrobussen*, Fraunhofer-Institut für Verkehrs-und Infrastruktursysteme, Dresden, Report, Eliptic workshop, 5 December 2017, Bremen.
- [69] Schmitz F.: *Ansätze aus Sich der Verkehrsunternehmen am Beispiel Deutschland*, VDV Report, Eliptic workshop, 5 December 2017, Bremen.
- [70] Basile R., Scheid H., Tanke D., Moeseler M., Häring R.: *Valeo Thermal Bus Systems Beheizungsstrategien für Elektrobuse*, Report, Eliptic workshop, 5 December 2017, Bremen.
- [71] *Klimatisierung von linienbussen der Zulassung klassen I und II, fur konventionell angetriebene Diesel-und dasbusse als auch fur Hybrid und Elektrobuse*, VDV-Schrift 236, Stand 03/2018.
- [72] Knot T., Wruck F.: *Extension of trolleybus operation methodology and results, case Eberswalde*, CIVITAS ELIPTIC Webinar: E-bus planning supported with simulation tools, 7 April 2017, Brussels.
- [73] Hegazy O., Coosemans T.: *Electrified buses in Brussels: Design considerations and charging strategy*, Vrije Universitet Brussel, CIVITAS ELIPTIC Webinar: E-bus planning supported with simulation tools, 7 April 2017, Brussels.
- [74] Sabate M.: *Air conditioning consumption in TMB Barcelona*, UITP-working group E-bus thermal comfort, meeting 20.3.2018, Brussels.

- [75] Ehsani M., Gao Y., Gay S., Emadi A.: *Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles-Fundamentals, Theory and Design*, CRC Press edition ISBN 0-8493-3154-4, 2004.
- [76] Давинић А., Пешић Р.: *Погонски системи у транспорту*, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, ИСБН: 978-86-6335-052-6, 2018.
- [77] Živanović Z., Nikolić Z.: *The Contribution and Prospects of the technical development on implementation of electric and hybrid vehicles*, (Book chapter 2). In: Stevic Z. (ed) *New generation of electric vehicles*, InTech, Rijeka 2012, pp. 29-66, ISBN 978-953-51-0893-1, <http://dx.doi.org/10.5772/51770>.
- [78] Živanović Z., Nikolić Z.: *The Application of Electric Drive Technologies in City Buses*, (Book chapter 6). In: Stevic Z. (ed) *New generation of electric vehicles*, InTech, Rijeka 2012, pp. 165-203, ISBN 978-953-51-0893-1, <http://dx.doi.org/10.5772/51770>.
- [79] Putz R.: *Options for fully electrified operation of urban bus line (EBSF Study)* - Landshut University of Applied Sciences, Brussels, 2012.
- [80] <http://www.aowei.com/en/program/applicationinfo-16.html>, (приступљено 21.01.2016).
- [81] Zivanovic Z., Diligenski Đ., Jovanovic Z., Sakota Z.: A Comparative Analysis of Hybrid Bus Powertrain Configurations, XXIV JUMV International Automotive Conference "Science & Motor Vehicles 2013", Belgrade, 23-24 April (2013), Proceedings on CD, Invited Paper NMV13HEV08, pp. 324-338, ISBN 978-86-80941-36-7.
- [82] New Generation Transport, Sub Mode Options Investigation, Mott MacDonald, United Kingdom, 2014. New Generation Transport, Sub Mode Options Investigation, Mott MacDonald, United Kingdom, 2014.
- [83] Zivanovic Z., Misanovic S.: Fully Electric Buses are Promising Technology in the Future, *International Congress "Motor Vehicles & Motors 2014"*, October 9<sup>th</sup>-10<sup>th</sup>, 2014, Kragujevac, Proceedings on CD, Introductory Lectures, MVM2014-IL8, pp. 81-106, ISBN 978-86-6335-010-6.
- [84] Solaris Urbino Electric-the Customers Choice, 2014, Transport weekly, <http://www.transportweekly.com/pages/en/news/articles/108034/>.
- [85] HIGER BUS COMPANY LIMITED: *Electirc bus KLQ6125GEV3 – Tehnička dokumentacija*, 2016.godina .
- [86] HyFleet:Cute: *Hydrogen transports, Bus technology&fuel for today and for a sustainable future,2009*, a report on the achievements and learnings from the HyFleet: Cute project 2003-2009.
- [87] Vukosavić S.: *Električna vuča*, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, 2005.
- [88] Wada Y., *Buses*, Society of Automotive Engineers of Japan, 2013. [http://www.jsae.or.jp/e07pub/yearbook\\_e/docu/07\\_buses.pdf](http://www.jsae.or.jp/e07pub/yearbook_e/docu/07_buses.pdf)
- [89] Rieck F.G, NEMS: Electric buses at Rotterdam, Clean fleets, Bremen, 12 December 2014. [http://www.clean-fleets.eu/fileadmin/files/e-Busz\\_Rotterdam\\_final\\_Ecomobiel-Bremen\\_-Rieck\\_small\\_.pdf](http://www.clean-fleets.eu/fileadmin/files/e-Busz_Rotterdam_final_Ecomobiel-Bremen_-Rieck_small_.pdf)
- [90] FLENDER, *Summation Gearbox for city buses-Technical Specification*, Rehsack (PTEK) 2003-11-10, Rev.1 2004-01-19.

- [91] Siemens, Industry Sector DT LD HD, 03/2011: <https://www.industry.usa.siemens.com/drives/us/en/electric-drives/hybrid-drives/automotive/Documents/elfa-components-data-sheets.pdf> (приступљено 14.02.2018).
- [92] JKP GSP "Beograd", Krstić P: Izveštaj o kontroli proizvodnje autobusa na električni pogon HIGER KLQ6125GEV3 i tehnička poseta kompaniji Higer Bus Company Limited, 2016. godina.
- [93] Mišanović S., Taranović D., Pešić R.: *Specifičnosti pogona i bezbednosnih mera upotrebe autobusa na električni pogon*, Stručni skup-Tehnički pregled vozila Republike Srpske 2016, Zbornik radova, str.83-100, ISBN 978-99976-673-1-1.
- [94] Hentunen A., Suomela J., Leivo A., Liukkonen M., Sainio P.: *Full-Scale Hardware-in-the-Loop Verification Environment for Heavy Duty Hybrid Electric Vehicles*, EVS25 World Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium, Shenzhen, China, 5-9 November 2010. World electric Vehicle Journal Vol.4 - ISSN 2032-6653-2010 WEVA, Pages: 119 -127.
- [95] Вукосавић С.: *Електричне машине*, Академска мисао, 2010.
- [96] Taranovic D., Mišanović S., Pešić R., Tica S.: *Development tendencies for electricity storage systems used on buses with pure electric drive*, International Congress Motor Vehicles & Motors 2016, Kragujevac, 6-7 October 2016, pp.119-126, ISBN 978-86-6335-037-3.
- [97] Maxwell technologies: *Challenges for lithium that UC benefit*, 2013.
- [98] Yutong Confidential: *Yutong bus introduction for EU*, 2017.
- [99] UITP-105.Bus Coommittee: *Tehnička poseta kompaniji Shenzen-bus*, 9.novembar 2018. Šenžen, Kina.
- [100] Yinlong, *Karakteristike litijum-titan-oksid baterija za E-bus*, zvanični odgovor za JKP GSP Beograd, decembar 2018.
- [101] Bombardier to Trial Wireless Electric Bus Charging, ElectricCarsReport, 2013, <http://electriccarsreport.com/2013/02/bombardier-to-trial-wireless-electric-bus-charging/> (приступљено 18.02.2016).
- [102] ZeEUS, *E-bus report #2, An updated overview of electric buses in Europe*, 2017.
- [103] International Energy Agency: *Global EV Outlook 2017*, <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/GlobalEVOutlook2017.pdf>. (приступљено 19.11.2018).
- [104] World Bank & PRTM Management Consultants, Inc.: *The China New Energy Vehicles Program. Challenges and Opportunities*, 2011.
- [105] <https://www.sustainable-bus.com/electric-bus/electric-bus-public-transport-main-fleets-projects-around-world/> (приступљено 16.04.2019).
- [106] <https://www.sustainable-bus.com/news/50000-electric-buses-out-of-byd-factories-in-nine-years/> (приступљено 16.04.2019).
- [107] Jinyoung P., *Electric Bus System in Korea*, The Korea Transport Institute, Busan, Korea, 2016.
- [108] Guida U.: *State of the European battery electrical buses*, US ZEB Conference 2018, 11-12 September 2018, Los Angeles.
- [109] <https://www.sustainable-bus.com/news/5-per-cent-of-city-buses-registered-in-2018-in-europe-were-electric-buses/> (приступљено 22.04.2019).
- [110] ГУП Мосгортранс: *Електробус для Москвы*, апрель 2020, (презентација у РРТ).

- [111] <https://www.busworld.org/industry/industry-news/all>(приступљено 15.08.2020.).
- [112] American Public Transportation Association. *2013 Public Transportation Vehicle Database*. August 2013.
- [113] U.S. Department of Transportation Federal Transit: *Peak Demand Charges and Electric Transit Bus*, White paper, October 2014.
- [114] CALSTART, *A Survey of Zero Emission Buses Across America*, August 17<sup>th</sup>, 2018, Pasadena.
- [115] <http://www.cbc.ca/news/canada/montreal/stm-montreal-electric-bus-fleet-1.4128347>. (приступљено 22.04.2019.).
- [116] [http://www.stm.info/en/about/major\\_projects/bus-network-electrification/electric-bus](http://www.stm.info/en/about/major_projects/bus-network-electrification/electric-bus). (приступљено 22.04.2019.).
- [117] <http://www.cbc.ca/news/canada/british-columbia/battery-bus-vancouver-1.4076487>. (приступљено 22.04.2019.).
- [118] <https://www.sustainable-bus.com/electric-bus/ecuador-20-byd-electric-buses-delivered-follows-chile/> (приступљено 22.04.2019.).
- [119] <https://www.sustainable-bus.com/electric-bus/byd-electric-buses-montevideo-uruguay-cutcsa/> (приступљено 30.05.2020.).
- [120] Auckland and Wellington–New Zealand–BYD tests: <http://evtalk.co.nz/electric-bus-trial-begins-in-auckland-and-wellington/>.(приступљено 22.04.2019.).
- [121] <https://www.sustainable-bus.com/hybrid/50-hybrid-buses-for-melbourne-deliveries-have-begun-cdc-victoria-to-roll-out-them-all-by-2022/>(приступљено 22.04.2019.).
- [122] <https://www.sustainable-bus.com/news/60-hess-24meter-ebuses-for-future-brisbane-australia-metro-network/>(приступљено 12.12.2020.).
- [123] Gillespie T.: *Fundamentals of Vehicle Dynamic.pdf*, Society of Automotive Engineers, Inc. (1992).
- [124] Јанковић Д., Тодоровић Ј.: *Теорија кретања моторних возила*, Машински факултет у Београду, 1978.
- [125] Todorović J.: *Kočenje motornih vozila: Teorija-projektovanje-održavanje-ispitivanje, monografija*, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd, 1988.
- [126] Larminie J., Lowry J.: *Electric Vehicle Technology Explained*, John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England, 2003.
- [127] Blair D.P: *Modeling Energy and Power Requirements of Electric vehicles*, Energy Conversions, vol.18 p.127-134, Pergamon press Ltd,1978, Great Britain.
- [128] Николић З.: *Електрична возила у свету и код нас*, Институт "Гоша", 2010. ISBN 978-86-86917-07-2.
- [129] UN ECE 107: Regulation No.107: *Uniform provisions concerning the approval of category M2 or M3 vehicles with regard to their general construction*.
- [130] Бунчић С.: *Техничка експлоатација моторних возила*, Саобраћајни факултет у Београду, 2000.
- [131] Kies A.. *A contribution to the analysis of fuel efficiency measures for heavy-duty vehicles*, Dissertation, Technische Universität Graz, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, 2<sup>nd</sup> August 2017.

- [132] "UITP Project SORT- Standardised On-Road Tests cycles", UITP, D/2009/0105/31, 2009.
- [133] "UITP Project E-SORT- *Cycles for electric vehicles*, UITP, D/2017/0105/9, 2017.
- [134] Nylund N.O, Erkkila K., Lappi M: *Comparasion of emission from diesel and CNG buses*, VTT, 2004.
- [135] Peng J., Jiang J., Ding F., Tan H.: *Development of Driving Cycle Construction for hybrid Electric Bus: A case study in Zhengzhou, China*, Sustainability 2020, 12, 7188; doi:10.3390/su12177188.
- [136] BYD - *Electric bus for the future*, <http://bydeurope.com/downloads/index.php>, приступљено сајту 1.6.2014. године.
- [137] Мишановић С., Žивановић З: *Analysis of energy efficiency and costs of service of fully electric buses in Belgrade public transport*, XXV JUMV International Automotive Conference "Science & Motor Vehicles 2015", Belgrade, 14-15 April 2015, Proceedings on CD, Paper NMV15AL04, pp. 285-294, ISBN 978-86-80941-36-7.
- [138] Мишановић С., Žивановић П., Savković D., Krstić P., Ivanov S., Stević S.: *Two-year successful exploitation of the electric buses in Belgrade*, Mobility & Vehicle Mechanics, Vol. 45, No. 1, (2019), pp. 17-27, DOI: 10.24874/mvm.2019.45.01.02.
- [139] Banković R.: *Planiranje javnog gradskog putničkog prevoza*, IRO "Gradjevska knjiga", Beograd, 1984.
- [140] Мишановић С.: *Статистичка анализа потрошње електричне енергије Е-буса Higer KLQ6125GEV3 на линији ЕКО 1 (Вуков споменик-Насеље Белвил) за период 2017-2019. година*, ЈКП ГСП Београд, интерни документ бр. 16378, новембар 2019. године.
- [141] Статистички годишњак Београда 2016. Секретаријат за управу, Сектор статистике, Београд 2017.
- [142] Klimatisierung von linienbussen der Zulassung klassen I und II, für konventionell angetriebene Diesel- und dasbusse als auch für Hybrid und Elektrobuse, VDV-Schrift 236, Stand 03/2018.
- [143] Vukadinović S.: *Elementi teorije veovatnoće I matematičke statistike*, Privredni pregled Beograd, 1990.
- [144] <https://freemeteo.rs/vreme/belgrade/istorija>, приступ: 30.1.2017; 10.8.2017; 10.2.2018; 10.3.2018; 30.4.2018; 18.10.2018; 10.7.2019; 5.10.2019; 20.10.2019.
- [145] Мишановић С., Тарановић Д., Krstić P., Žивић Д.: *Measurement of recovery electricity on the E-bus Higer KLQ6125GEV3 on EKO 1 line in Belgrade and impact on energy efficiency*, 8<sup>th</sup> International Congress Motor Vehicles & Motors 2020, Kragujevac, 8-9 October 2020, Book of Proceedings, ISBN 978-86-6335-074-8, pp. 67-75.
- [146] Schildcrout J.S., Sheppard L., Lumley T., et al.: *Ambient air pollution and asthma exacerbations in children: an eight-city analysis*. Am J Epidemiol 2006; 164: 505-17.
- [147] WHO: *Health effects of particulate matter. Policy implications for countries in eastern Europe, Caucasus and central Asia*. Copenhagen: World Health Organization Regional Office for Europe, 2013. Available from [http://www.euro.who.int/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0006/189051/Health-effects-ofparticulate-matter-final-Eng.pdf](http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0006/189051/Health-effects-ofparticulate-matter-final-Eng.pdf).
- [148] Kovačević G.: *Procena uticaja kvaliteta vazduha na pogoršanje alergijskog rinitisa i astme*, doktorska disertacija, Medicinski fakultet u Beogradu, 2019. година.

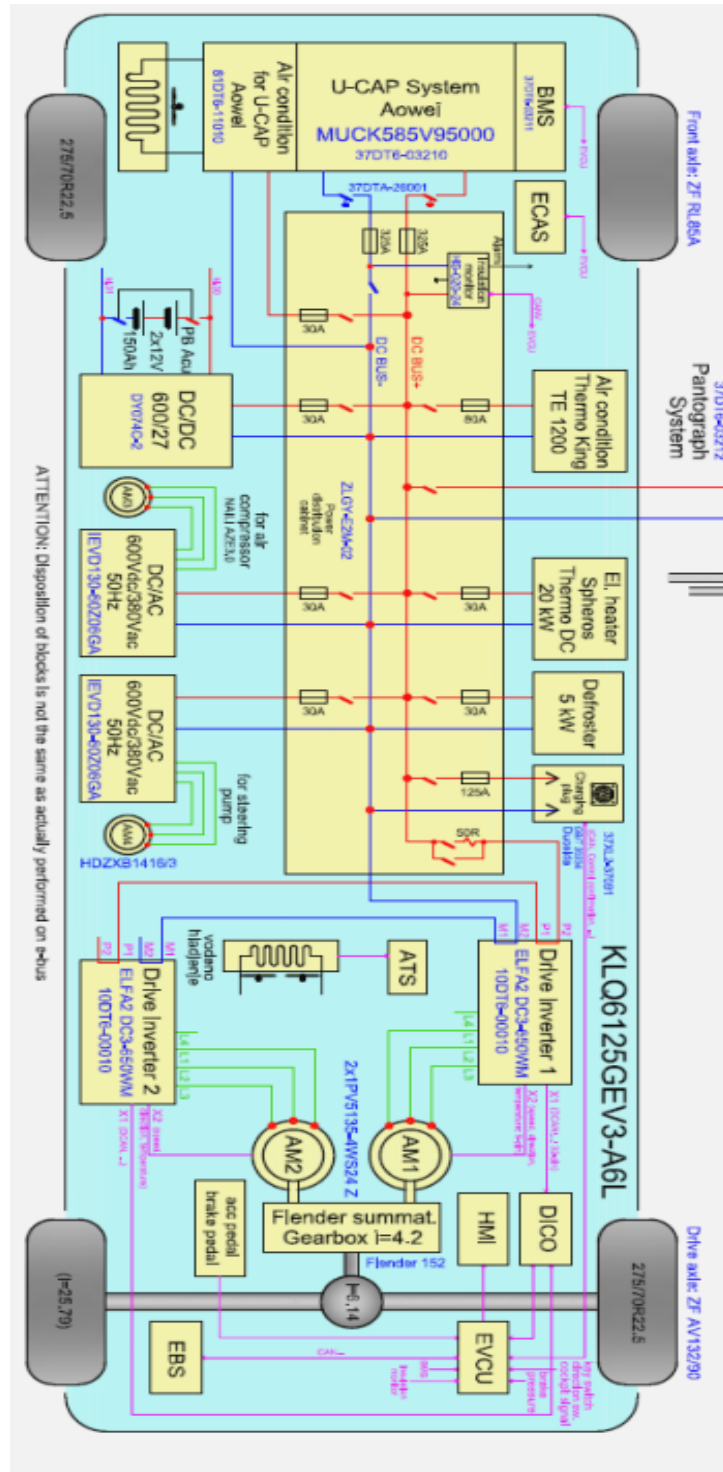


- [149] *План квалитета ваздуха у агломерацији Београд*, Секретаријат за заштиту животне средине Града Београда, фебруар 2016.године.
- [150] \*\*\*, European Commission – *How to Develop a Sustainable Energy Action Plan (SEAP) Part 2*, Guidebook, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2010, [http://www.eumayors.eu/IMG/pdf/seap\\_guidelines\\_en.pdf](http://www.eumayors.eu/IMG/pdf/seap_guidelines_en.pdf).
- [151] Edwards R., Larive J-F., Beziat J-C.: *Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive fuels and Powertrains in the European Context*, EC Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport, Report Version 3C, July 2011. EUR 24952 EN, ISBN 978-92-79-21395-3 (PDF).
- [152] UITP Environmental Cost Annex IV, V3.1 XLS, Version 3.1. UITP, 20 May 2020.
- [153] \*\*\*, *Извештај о раду Агенције за Енергетику за 2018. годину*, Агенција за Енергетику Републике Србије, 2018.
- [154] \*\*\* Јавно предузеће СРБИЈАГАС - Нови Сад, [http://www.srbijagas.com/?page\\_id=1410](http://www.srbijagas.com/?page_id=1410), приступ сајту ( 25.2.2020.године).
- [155] \*\*\*Electric Distribution Company of Serbia (EPS), Annual Technical Report 2015, (in Serbian), <http://www.eps.rs>.
- [156] Јовановић В.: *Истраживање могућности процене емисије сумпорних и азотних оксида из термоелектрана у Србији*, докторска дисертација, Машински факултет, Универзитет у Београду, 2012.
- [157] \*\*\*, [www.energy-community.org/inplementation/serbia.html](http://www.energy-community.org/inplementation/serbia.html) (приступ сајту 15.12.2019.године).
- [158] \*\*\*, The World Bank: *Electric Power Transmission and Distribution Losses*, <http://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.LOSS.ZS> (приступ 10.11.2017.).
- [159] Milojevic S.: *Sustainable application of natural gas as engine fuel in city buses: Benefit and restrictions*, JAES, 15(2017)1, 416,pp.81-88, doi:10.5937/jaes15-12268.
- [160] Milojevic S., Gročić S., Dragojlovic D.: *CNG propulsion system for reducing noise of existing city buses*, JAES,14 (2016)3, 392, pp 377-382, doi:10.5937/jaes14-10991.
- [161] Ćurčić S., Pavlović M., Arsovski S., Tomović A.: *Direktive EU о управљању електронским отпадом у EU*. Festival kvaliteta 2015, Zbornik radova, strane 267-272, 2015, Kragujevac.
- [162] ЈКП ГСП "Београд": *Елаборат о расходу аутобуса ЈКП ГСП Београд*, Интерни документ.2014. година.
- [163] ЈКП ГСП "Београд": *Правилник о поступању са отпадом у ЈКП ГСП Београд*, Интерни документ, 2020. година.
- [164] UITP: *Bus tender structure, 3<sup>rd</sup> Edition including tendering for E-bus*, 2018,D/2018/0107/18, Brussels.
- [165] Pütz R.: *Auf dem Weg zum Elektrobus–Analyse der Lebenszykluskosten verschiedener Busantriebskonzepte*, Hochschule Landshut–Institut für Nutzfahrzeugtechnik, Clean Fleets – Stadtbusse in der Beschaffung, Bremen, 11. Dezember 2013,[http://www.clean-fleets.eu/fileadmin/files/P%C3%BCtz\\_Clean\\_Fleets\\_11\\_12\\_2013.pdf](http://www.clean-fleets.eu/fileadmin/files/P%C3%BCtz_Clean_Fleets_11_12_2013.pdf).
- [166] Zivanovic Z.,Petkovic S.,Misanovic S., Holo A.: *CNG buses in Serbia-some operational experiences*, FME Transaction, Volume 43, No.2, 2015, pp.89-99, ISSN 1451-2092.

- [167] Pihlatie M.: *Electric buses, from pre-commercial pilot to roll-out*, VTT Technical Research Centre of Finland, 12 October 2016.
- [168] Higer Bus Company, *Karakteristike superkondenzatora za E-bus, zvanični odgovor za JKP GSP Beograd*, januar 2018.
- [169] ЈКП ГСП "Београд": *Тендерска документација куповине 5 Е-буса у ЈКП ГСП Београд*, ВНД-302/15, XIV-302/3, 2015/2016, Београд; *Тендерска документација куповине дизел соло аутобуса у ЈКП ГСП Београд*: ВНД-52/16, ВНД-40/19 и ВНД-41/19.
- [170] Busworld Europe 2019: *Medjunarodni sajam autobusa*, 18-23.oktobar 2019. Brisel, Belgija.
- [171] Yinlong, Gree Electric (000651) *Acquiring Yinlong New Energy*, Equity Research Report, 2016.
- [172] Fabula Konsultant Beograd, Beoconex d.o.o Beograd: *Студија оправданости набавке 80 електроаутобуса*, март 2018. Београд.
- [173] ЈКП ГСП "Београд": *План рада и пословања за 2020. годину*, децембар 2019. Године.
- [174] UITP Bus Coommittee: *Life Cycle Cost of Compressed Natural Gas Buses*, Final report of the working group, September 2008, Brussels.
- [175] ЈКП ГСП Београд: *Информациони систем-база података магацинско пословање*, приступ бази 6.03.2020.године.

ПРИЛОГ 1

Блок шема Е-буса Higer KLQ6125GEV3 Electric



Слика П1.1 Блок шема система и компоненти аутобуса на електрични погон Higer KLQ6125GEV3 Electric [85]

## ПРИЛОГ 2

## Техничке карактеристике Е-буса Higer KLQ6125GEV3 Electric

Аутобус на потпуно електрични погон Higer KLQ6125GEV3 Electric је савремени нископодни соло градски аутобус који испуњава све техничке захтеве сходно Директиви Европске Комисије 2007/46 (Directive EC/2007/46) и Регулative 136/2014 (Regulation EU 136/2014) која се односи на испуњеност техничких услова код аутобуса за јавни градски превоз путника укључујући и аутобусе на електрични погон. Е-бус користи суперкондензатор за складиштење електричне енергије капацитета 20 kWh.

Техничке карактеристике Е-буса Higer KLQ6125GEV3 приказане су у табели П2.1.

Табела П2.1 Техничке карактеристике Е-буса Higer KLQ6125GEV3 Electric

| Произвођач  | Higer  |
|---|--|
| Тип   | KLQ6125GEV3 Electric   |
| Дужина/ширина/висина  | 12.000/2.550/3.680 mm  |
| Маса празног возила   | 12.550 kg  |
| Капацитет путника   | 82+1   |
| Максимална брзина   | 70 km·h <sup>-1</sup>  |
| Управљачка, погонска осовина, преносни однос у главном преноснику | ZF RL-85A, ZF AV132/90<br>1:6,14                                       |
| Складиштење електричне енергије, произвођач, ознака               | Суперкондензатор,<br>AOWEI, U-CAP (37DT6-03210)                        |
| Капацитет   | 20 kWh   |
| Начин пуњења  | Брзо пуњење на терминусима,<br>660 V DC или 3x380 V AC                 |
| Време пуњења  | 5-10 минута  |
| Погонски мотори   | 2 електромотора упарена,<br>преко збирног преносника снаге (редуктора) |
| Произвођач, ознака електромотора                                  | Siemens, 1PV5135-4W24  |
| Снага   | 2x67 kW (трајно опт.), 2x90 kW (5 мин),<br>2x150(1мин)                 |
| Обртни момент   | 2x430 Nm   |
| Збирни преносник снаге (редуктор), произвођач, преносни однос     | Flender, 1:4,2   |
| Инвертори за погон, произвођач, ознака радни опсег                | Siemens, ELFA 2 DC3 650 WM,<br>580 V DC/500-650V AC                    |
| Контролер   | Siemens 10DT6  |
| Статички претварач, произвођач, ознака, радни опсег               | Smest Co.LTD, DY074C,<br>12-24-48 V DC                                 |
| Пантограф   | AOWEI 37DT6-03212  |
| Систем за хлађење   | Thermoking 81DT6   |
| Систем за грејање   | Spheros  |
| Пумпа управљача   | KVD HDZXB 1416   |
| Компресор   | IEM ER 230   |
| Хладњак за суперкондензатор                                       | AOWEI 37DT6  |
| Спољни дисплеј  | Novatronic   |

Систем пуњења Е-буса је са брзим пуњењем које се обавља на почетно-завршним стајалиштима (терминусима) где су постављени пуњачи снаге од 150 kW. Контакт са пуњачем врши се помоћу покретног пантографа који се налази на крову Е-буса. Пуњачи имају могућност повезивања на наизменични напон из градске дистрибутивне електричне мреже или на једносмерни напон из трамвајско-тролејбуске контактне мреже, што је примењено на линији ЕКО 1, како је приказано на сликама П2.1 и П2.2.



Слика П2.1 Пуњење Е-буса  
терминус "Белвил", 3x380 V (AC)



Слика П2.2 Пуњење Е-буса,  
терминус Вуков споменик,  
660 V (DC)

Е-бус је опремљен савременом информатичком опремом и CAN (CAN-Controller Area Network) мрежом (магистралама). CAN омогућава размену података између уређаја и система на возилу и микроконтролера без потребе повезивања истих са централном рачунарском јединицом возила. CAN магистрале раде по дефинисаним протоколима где различити модули на мрежи размеђују поруке. CAN магистрала ради на принципу multi-master што обезбеђује меморисање прикупљених података на мрежи из више управљачких јединица. Сва друмска возила од 1991. године имају CAN мрежу дефинисану према стандарду ISO 11898. Детаљна блок шема конфигурације CAN мреже код аутобуса Higer KLQ6125GEV3 Electric приказана је на слици П.2.3 [92].

Е-бус има неколико CAN магистрала и излаза што омогућава читавање и меморисање података. D-CAN магистрала омогућава комуникацију између погонских електромотора и инвертора са контролером. M-CAN магистрала омогућава приказ одређених података са различитих модула система на возилу на инструмент табли возила како би возач током вожње имао увид у рад важних система на возилу. Преко M-CAN магистрале се возачу преносе информације о статусу појединих система на Е-бусу (притисак ваздуха у кочним колима, напуњености суперкондензатора, статус врата...). V-CAN и S-CAN магистрале омогућавају важне информације о раду Е-буса које је могуће пратити у реалном времену (Real time).

Поједини подаци су присутни на обе магистрале али са различитом прецизношћу и резолуцијом приказа истих. Преко V-CAN магистрале се са већом тачношћу (већина сигнала је доступна и на S-CAN магистралама) могу пратити величине као што су: јачина струје, напона које испоручује суперкондензатор, брзина возила, температура суперкондензатора, статус система трансмисије (ход унапред, празан ход, ход уназад) који се приказује помоћу стања 0 - искључено и 1 - укључено.

S-CAN магистрала омогућава већу тачност аквизиције података као што су степен напуњености суперкондензатора, обртни момент погонских електромотора, број обртаја електромотора, положај команде „гаса“ и кочнице.





### ПРИЛОГ 3

#### Мерна опрема Fluke и позиције мерне опреме на Е-бусу Higer KLQ6125GEV3 Electric

Табела П3.1 Карактеристике мерног уређаја Fluke 289



Слика П3.1  
Мерни уређај Fluke 289

| Функција                              | Опсег мерења и резолуција  | Тачност мерења |
|---------------------------------------|--|----------------|
| Напон DC                              | 50.000 mV, 500.00 mV, 5.0000 V, 50.000 V,  | 0,025 %        |
| Напон AC                              | 500.00 V, 1000.0 V   | 0,4 %          |
| Струја DC                             | 500.00 $\mu$ A, 5000.0 $\mu$ A, 50.000 mA, 400.00 mA   | 0,15 %         |
| Струја AC                             | 5.0000 A, 10.000 A   | 0,7 %          |
| Температура                           | -200.0 °C до 1350.0 °C   | 1.0 %          |
| Отпорност                             | 50.000 $\Omega$ , 500.00 $\Omega$ , 5.0000 k $\Omega$ , 50.000 k $\Omega$ ,<br>500.00 k $\Omega$ , 5.0000 M $\Omega$ , 50.00 M $\Omega$ , 500.0 M $\Omega$ | 0,05%          |
| Капацитет                             | 1.000 nF, 10.00 nF, 100.0 nF, 1.000 $\mu$ F, 10.00 $\mu$ F,<br>100.0 $\mu$ F, 1000 $\mu$ F, 10.00 mF, 100 mF   | 1,0 %          |
| Фреквенција                           | 99.999 Hz, 999.99 Hz, 9.9999 Hz, 99.999kHz,<br>999.99 kHz  | 0,005%         |
| Радна температура                     | -20 °C до 55 °C  |                |
| Максимални временски интервал снимања | 250 $\mu$ s  |                |
| Електромагнетна компатибилност        | EMC EN 1326-1  |                |
| Меморисање резултата мерења           | До 10,000, *.csv.file  |                |
| Димензије; маса                       | 22,2 cm x 10,2 cm x 6,0 cm; 870.9 g  |                |



Слика П3.2 Мерење напона и струје пражњења/пуњења суперкондензатора



Слика П3.3 Мерење струје потрошње и рекуперације на инверторима погонских мотора



Слика П3.4 Мерење струје потрошње система за грејање путничког и возачевог простора

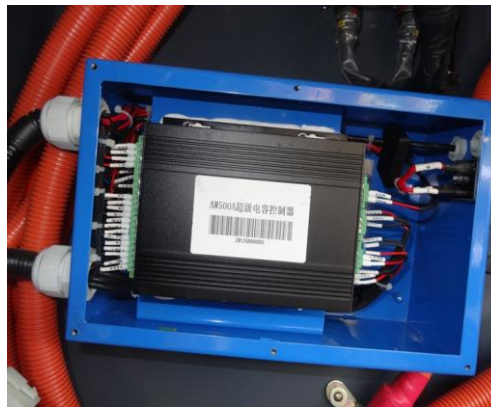


Слика П3.5 Fluke 190-204 Score meter

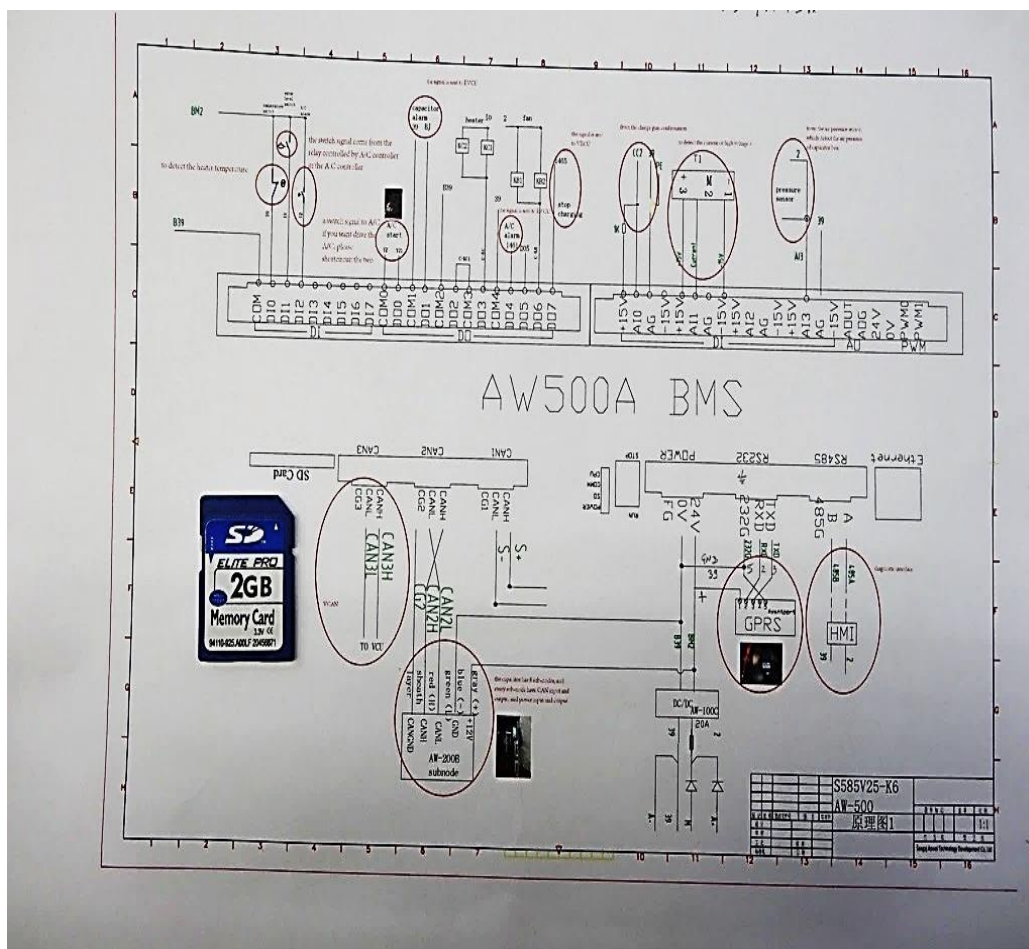


Слика П3.6 Струјна кљешта (Fluke 1010)

**Контролна јединица, BMS (Battery management system)**



Слика П3.7 BMS-Battery management system, контролна јединица код Е-буса Higer KLQ6125 GEV3



Слика П3.8 BMS контролна јединица-блок шема код Е-буса Higer KLQ6125 GEV3



## ПРИЛОГ 4

### Мерење нивоа буке на Е-бусу Higer KLQ6125GEV3 Electric

Табела П4.1 Карактеристике мерног уређаја Лутрон  
(Lutron SL-4001)

| Опис               | Карактеристике                 |
|--------------------|--------------------------------|
| Дисплеј            | 18 mm, LCD                     |
| Опсег мерења буке  | 30-80 dB, 50-100 dB, 80-130 dB |
| Резолуција         | 0,1 dB                         |
| Фреквенција        | 31,5 Hz – 8000 Hz              |
| Микрофон           | Електронски-кондензаторски     |
| Време одзива       | "брзо" 200 ms, "споро" 500 ms  |
| Температурни опсег | 0 °C - 50 °C                   |
| Напајање           | Батерија, 9 V DC               |
| Димензије          | 205 mm x 85 mm x 35 mm         |
| Маса               | 250 g                          |



Слика П4.1 Lutron SL-4001



Слика П4.2 Полигон за мерење нивоа буке Е-буса



Слика П4.27 Lutron SL-400,  
припремљен за мерење

## БИОГРАФИЈА АУТОРА

Слободан Мишановић је рођен 23.06.1968. године у Земуну, Србија. Основну школу "Светислав Голубовић" завршио је у Батајници а средњу Електро техничку школу "Никола Тесла" у Београду са одличним успехом. Дипломирао је на Саобраћајном факултету у Београду 05.07.1994. године на одсеку за друмски и градски саобраћај и транспорт. Докторске студије на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу уписао је 2015. године, студијски програм Машинско инжењерство (моторна возила-мотори) и положио све испите са просечном оценом 10 (десет).

Од 1994. године запослен је у ЈКП ГСП "Београд" где сада обавља послове Пројект менаџера предузећа. Област рада усмерена је на: примену алтернативних погонских система код аутобуса, проблеме енергетске ефикасности и еколошког утицаја возила у систему јавног градског транспорта, техно-економске анализе аутобуског подсистема, моделирање и симулацију рада аутобуса.

Од 2005. године стални је члан UITP Bus Committee (International association for public transport, Brussels) где је имао активну улогу у изради SORT (Standard on road test) методологије за мерење потрошње погонског горива код аутобуса, која је званична методологија у Европској Унији и подршка Directive EC 2009/33. Током 2015-2016. године имао је водећу улогу у имплементацији пројекта увођења прве линије ЕКО 1 у Београду на којој ради 5 аутобуса на потпуно електрични погон. Учесник је програма: "Hybrid user forum Bus-section" (2011-2014) EC FP 7, "Clean Fleets", EC FP 7 (2011-2015), ZeEUS-User group, project EC (2015-2018). Консултант за Град Крагујевац на пројекту E-GUTS (Electric green urban transport system) 2018-2019. године.

Посебно треба истаћи велико међународно искуство и успостављену сарадњу са највећим светским компанијама за јавни градски превоз, произвођачима аутобуса и центрима за испитивање возила. Стручно усавршавање је обавио кроз техничке посете у преко 30 највећих компанија: Мосготранс Москва, RATP Paris, TMB Barcelona, TfL London, EMT Madrid, TEC Namur, SBB Stuttgart, ATM Milano, RTA Dubai, LPP Praha, Shenzhen bus company, MOVIA Copenhagen, CUTCSA Montevideo, Solaris bus&Coach S.A, Volvo, Higer, BYD, "Applus IDIADA", Belicon institut Landshut, CALSTART Institut Pasadena CA-USA, CIAH Beograd...) где су била представљена искуства у експлоатацији, производњи и тестирању аутобуса за градски превоз.

Има положен стручни испит за дипломираног инжењера саобраћаја, завршене семинаре: "The business success through Sustainability", Будва 2010; Workshop "JRC tools to support the reduction of fuel/energy consumption, CO2 and pollutant emissions from road transport in Europe", Belgrade 2017. На UITP-workshop који је одржан 2018. године у Београду посвећеном коришћењу Е-буса био је тренер у сесији планирање и експлоатација рада Е-буса. Имао је запажено учешће на "Hybrid electric vehicle symposium-2019" који је у организацији SAE-International одржан у Анахајму (Anaheim, California-USA) од 19-21.2.2019.године. Објавио је преко 40 научних и стручних радова. Говори, чита и пише на енглеском језику.

Ожењен је, отац двоје деце.

**ИЗЈАВА АУТОРА О ОРИГИНАЛНОСТИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Ја, Слободан М. Мишановић, изјављујем да докторска дисертација под насловом:

Енергетске и еколошке перформансе аутобуса на електрични погон у систему транспорта путника

која је одбрањена на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу представља *оригинално ауторско дело* настало као резултат *сопственог истраживачког рада*.

*Овом Изјавом такође потврђујем:*

- да сам *једини аутор* наведене докторске дисертације,
- да у наведеној докторској дисертацији *нисам извршио/ла повреду* ауторског нити другог права интелектуалне својине других лица,
- да умножени примерак докторске дисертације у штампаној и електронској форми у чијем се прилогу налази ова Изјава садржи докторску дисертацију истоветну одбрањеној докторској дисертацији.

У Крагујевцу, 3.11.2020. године,



потпис аутора

**ИЗЈАВА АУТОРА О ИСКОРИШЋАВАЊУ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Ја, Слободан М. Мишановић,

дозвољавам

не дозвољавам

Универзитетској библиотеци у Крагујевцу да начини два трајна умножена примерка у електронској форми докторске дисертације под насловом:

Енергетске и еколошке перформансе аутобуса на електрични погон у систему транспорта путника

која је одбрањена на Факултету инжењерских наука

Универзитета у Крагујевцу, и то у целини, као и да по један примерак тако умножене докторске дисертације учини трајно доступним јавности путем дигиталног репозиторијума Универзитета у Крагујевцу и централног репозиторијума надлежног министарства, тако да припадници јавности могу начинити трајне умножене примерке у електронској форми наведене докторске дисертације путем *преузимања*.

Овом Изјавом такође

дозвољавам

не дозвољавам<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Уколико аутор изабере да не дозволи припадницима јавности да тако доступну докторску дисертацију користе под условима утврђеним једном од *Creative Commons* лиценци, то не искључује право припадника јавности да наведену докторску дисертацију користе у складу са одредбама Закона о ауторском и сродним правима.

припадницима јавности да тако доступну докторску дисертацију користе под условима утврђеним једном од следећих *Creative Commons* лиценци:

- 1) Ауторство
- 2) Ауторство - делити под истим условима
- 3) Ауторство - без прерада
- 4) Ауторство - некомерцијално
- 5) Ауторство - некомерцијално - делити под истим условима
- 6) Ауторство - некомерцијално - без прерада<sup>2</sup>

У Крагујевцу \_\_\_\_\_, 3.11.2020. године,



\_\_\_\_\_  
потпис аутора

---

<sup>2</sup> Молимо ауторе који су изабрали да дозволе припадницима јавности да тако доступну докторску дисертацију користе под условима утврђеним једном од *Creative Commons* лиценци да заокруже једну од понуђених лиценци. Детаљан садржај наведених лиценци доступан је на: <http://creativecommons.org.rs/>